



PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE EIXOS DE BITOLAS VARIÁVEIS NO MATERIAL RODANTE FERROVIÁRIO BRASILEIRO

Por,
Fillipe Germano dos Santos

Brasília, 29 de Novembro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

**FACULDADE DE
TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA**

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE EIXOS DE BITOLAS VARIÁVEIS NO MATERIAL RODANTE FERROVIÁRIO BRASILEIRO

POR,

Fillipe Germano dos Santos

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Aida Fadel (orientadora)

Prof. Dianne Viana (co-orientadora)

Prof. Alberto Carlos G. Castro Diniz

Prof. Jorge Luiz de A. Ferreira

Brasília, 29 de Novembro de 2011

Agradecimentos

A Deus, por me proporcionar a chance de concluir mais uma fase de minha vida.

Às professoras orientadoras, pelo auxílio em todas as horas.

À minha família, pela confiança, motivação e compreensão.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração em relação à essa jornada.

Aos profissionais consultados, pela concessão de informações valiosas para a realização deste estudo.

A todos que, com boa índole, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

E em especial ao grande David Añaña que manda muito bem em tudo que faz!

RESUMO

Este trabalho consiste numa análise preliminar como subsídio ao desenvolvimento do protótipo de uma máquina nacional para automatizar o processo de transferência de material rodante entre malhas ferroviárias de bitolas diferentes. A solução adotada como ideal nesse projeto consiste na implantação de um rodeiro de bitola variável, que possa trafegar tanto nas ferrovias de 1 m e de 1,6 m presentes no Brasil, sem a necessidade de alteração do truque do material rodante. A metodologia criada é dividida em cinco partes: Primeiramente, é realizada uma análise da malha ferroviária nacional e das alterações necessárias para transbordo de carga entre conexões. Em seguida, foi realizada uma comparação entre as soluções aplicadas atualmente buscando comprovar a utilização do eixo de bitola variável. As restrições dimensionais de ambas as vias foram estudadas para não ter interferência nos gabaritos de via e definir quais componentes de cada bitola serão utilizados. Uma metodologia de cálculo foi estudada para aproximar as limitações de estabilidade do material rodante de cada bitola para assim serem aplicados ao trem que possa utilizar ambas as vias com segurança. As alterações em relação aos sistemas já existentes para a possibilidade de implantação do sistema no Brasil são analisadas, e em seguida, o escopo do projeto e soluções encontradas para o sistema é apresentado.

Palavras-chave: Sistema ferroviário brasileiro; Integração ferroviária; Transbordo de cargas; Bitolas de ferrovias; eixo de bitola variável.

ABSTRACT

This work presents a preliminary analysis which will aid the development of a prototype for a machine to automate the rolling stock transfer process between different railroad track sizes. The solution adopted in this project as an ideal is the establishment of a Rode gauge variable, which can travel in both the railroads which exists in Brazil, without the need to change the track of rolling stock. First, an analysis of the national rail network and the changes needed to transfer load between connections are made. A comparison between the solutions implemented currently seeking to prove the use of variable gauge axle, and a calculation methodology has been designed to bring together the advantages and limitations of the undercarriage of each gauge to be applied to the train so that it can use both routes safely. Then the project scope and solutions for the system is presented.

Key-words: Brazilian railway system, Rail vs. Highway, railway integration, gauges of railways; axis variable gauge

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Aspectos Gerais dos modais de transporte.....	3
2. SISTEMA FERROVIÁRIO BRASILEIRO	6
2.1 Origens das Ferrovias e das Locomotivas	6
2.2 A Ferrovia no Brasil – Histórico.....	10
2.3 A Ferrovia no Brasil – Cenário Atual.....	16
2.4 Corredores e Concessionárias.....	18
2.5 Material Rodante	20
2.6 Bitolas Ferroviárias.....	21
2.7 Interligações dos Corredores Nacionais.....	21
2.6 Interligação da Malha Ferroviária Sul-Americana.....	23
2.7 Bitolas	26
2.8 Soluções Adotadas na Transferência.....	30
2.9 Conclusões Preliminares	30
3. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES DE TRANSFERÊNCIA	31
3.1 Técnicas de Transferência.....	31
3.1.1 Transbordo manual e mecanizado da carga.....	32
3.1.2 Troca de Truque de Vagões e Locomotivas.....	32
3.1.3 Implantação do Terceiro Trilho	34
3.1.4 Eixos de Bitolas Variáveis.....	35
3.2 Comparações entre as soluções	38
3.2.1 Quadro de vantagens.....	39
3.2.2 Comparação econômica entre as soluções	40
3.2.3 Tempos e custos de operação.....	41
3.2.3 Análise da viabilidade das soluções	42
4. DINÂMICA E ESTABILIDADE DO TREM	44

4.1 Cálculo da superelevação	45
4.1.2 Cálculo da superelevação – Trens de passageiros.....	48
4.2 Velocidades Limites nas Curvas	49
4.3 Cálculo da Excentricidade.....	51
4.4 Sobrecarga nas Curvas	52
4.5 Forças Laterais nas Rodas	54
4.6 Utilização de Material e Normas Padrão	55
4.7 Análise dos Resultados.....	56
5. ALTERAÇÕES NO MATERIAL RODANTE	57
5.1 Eixos	57
5.1.1 Eixos móveis	58
5.1.2 Eixo de Rodas Deslizantes	59
5.2 Cálculo de Resistência do Eixo.....	60
5.2.1 Eixo com rodas deslizantes	60
5.2.1.2 Demais componentes	68
5.2.2 Eixos Móveis	70
5.2.2.2 Demais componentes	72
6. CONCLUSÃO.....	74
7. BIBLIOGRAFIA.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Puffing Billy	7
Figura 2.2 - Ferrovia Transiberiana	8
Figura 2.3- Malha ferroviária do Brasil.....	17
Figura 2.4 - Comparação extensão ferroviária entre os Países	17
Figura 2.5 - Corredores ferroviários	19
Figura 2.6 - Planta Locomotiva Diesel-Elétrica (ANTF)	20
Figura 2.7 - Principais classificações das locomotivas (ANTF).....	20
Figura 2.8 - Corredores de bitola larga e estreita Sudeste (ANTF)	21
Figura 2.9 - Ligações internacionais – (ALAF).....	23
Figura 2.10 - Malha ferroviária Argentina (ALAF).....	26
Figura 2.11- Bitola	27
Figura 2.12 - Mapa ferroviário Brasileiro (ANTF).....	28
Figura 3.1- Truque de Vagão (Borges Neto, 2010)	32
Figura 3.2 - Truque de locomotiva (EIF Locomotivas).....	33
Figura 3.3 - Troca de truques manual.....	33
Figura 3.4-Alteração bitola de truque (EIF Locomotivas).....	34
Figura 3.5-Implantação do terceiro trilho (Portogente)	34
Figura 3.6-Via permanente de duas bitolas (Portogente).....	35
Figura 3.7 Trilho hidráulico de transferência	36
Figura 3.8.....	40
Figura 3.9.....	36
Figura 3.10.....	40
Figura 3.11.....	36
Figura 3.12	37
Figura 3.13 - Trem passando por trilho de transferência	37
Figura 3.14 - Fases da transferência	37

Figura 3.15 - Truque de Bettendorf (wikipedia, 2011)	38
Figura 3.16- Gráfico de tempo de operação	42
Figura 3.17 - Gráfico de custo de operação.....	42
Figura 4.1 - Diagrama 1 do Veículo	45
Figura 4.2 - Diagrama 2 do Veículo	47
Figura 4.3 - Diagrama 3 do Veículo	50
Figura 4.4 - Diagrama 4 do Veículo	52
Figura 4.5 - Diagrama 5 do Veículo	53
Figura 4.6 - Diagrama forças na roda	54
Figura 5.2 - Eixo deslizante - Bitola Larga (CAF, 2011)	58
Figura 5.1- Eixo deslizante - Bitola estreita (CAF, 2011)	58
Figura 5.3 - Diagrama de forças no centro de massa do vagão e nas rodas	61
Figura 5.4 - Diagrama de forças no centro de massa do vagão e nos eixos	62
Figura 5.5 - Diagrama de esforços no eixo	62
Figura 5.6 - Diagrama de esforços no eixo com momento da roda.....	63
Figura 5.7 - Resultado dos momentos	63
Figura 5.8 - Diagrama 3	64
Figura 5.9 - Diagrama de momentos 2	65
Figura 5.10 - Diagrama 5	71
Figura 5.11- Diagrama 6	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Comparativo de eficiências (FLEURY, 2001)	3
Tabela 1-2 - Competição intermodal nos EUA	3
Tabela 1-3 - Competição intermodal no Brasil	4
Tabela 2-1 - Ferrovias e datas de inauguração	10
Tabela 2-2 - Ferrovias e datas de inauguração II	11
Tabela 2-3 - Crescimento das Estradas de Ferro no Brasil	12
Tabela 2-4 -Privatização ferrovias	16
Tabela 2-5 - Dados das ferrovias por país e região	18
Tabela 2-6- Características das Ferrovias do Brasil (Ferronorte)	29
Tabela 2-7 Comparação lotação dos vagões	29
Tabela 3-1- Comparação das soluções	39
Tabela 4-1 - Valores de restrições nas normas	55
Tabela 4-2 - Valores Calculados	56
Tabela 5-1- Valores para o cálculo dos eixos	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos:

		a	alternado
b	bitola	c	centrífuga
B	Distância centro a centro	e	estabilidade
c	Largura do boleto do trilho	m	médio
F	Força	p	prático
Fc	binário trilho	r	reviramento
Fc	Força centrífuga	r	resultante
g	gravidade	t	teórico
G	Centro de massa	w	peso
G'	Centro de massa deslocado		
G	forças de reação		
M	Momento		
n	Fator de segurança		
m	Massa do veículo		
P	peso do veículo,		
R	raio de trajetória		
<i>R</i>	resultante de forças		
Tku	Tonelada útil por quilômetro		
v	velocidade em m/s		
V	velocidade em km/h		

Símbolos Gregos:

Γ	Aceleração
σ'	Tensão
ρ	raio de curvatura

Subscritos

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAR	Association of American Railroads
ALL	América Latina Logística
ANTF	Associação Nacional dos Transportes Ferroviários

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o a introdução a este trabalho, citando as justificativas e os motivos para o desenvolvimento do mesmo. Em seguida uma análise dos tipos de transporte no Brasil, e a metodologia do trabalho é apresentada.

1.1 Apresentação

O Brasil é hoje a 8ª economia do mundo, com um crescimento do PIB (Produto interno bruto) de cerca de 7% ao ano, classificando-se entre umas das maiores economias emergentes. Não obstante, é fato que a infraestrutura e o sistema de transporte e logística brasileiros não acompanharam tal crescimento, freando o crescimento da economia e prejudicando o desenvolvimento do país.

Que a situação dos transportes no Brasil é crítica não é novidade. Em 2006, a Confederação Nacional das Indústrias publicou a ‘Reforma Institucional dos Sistemas de Transportes’ (CNI, 2006), citando esta crise e identificando como principais problemas presentes no cenário brasileiro:

- Elevada e crescente deterioração da rede viária terrestre;
- Dificuldades no acesso aos portos - tanto pela via terrestre, quanto marítima;
- Modelo de gestão do Estado ineficiente, e não profissionalizado;
- Ausência de planejamento e de políticas de integração entre os modais;
- Marcos regulatórios defasados e inadequados à evolução recente do transporte mundial.

Essa precariedade resulta num sistema de transporte ineficiente e muito mais caro comparado a média mundial, comprometendo o crescimento do país e interferindo na produção e comercialização de bens e serviços.

De acordo com o cenário descrito, este trabalho busca analisar soluções que têm sido adotadas por outros países e propor alternativas para a integração do sistema ferroviário brasileiro. O desenvolvimento de uma malha ferroviária integrada permitiria um melhor escoamento da produção brasileira, minimizando as perdas devido à logística (que chegam a 15%). Incrementaria a concorrência logística entre os modais, baixando os preços agregados aos produtos. Incentivaria o comércio e a expansão de empresas em âmbito nacional e internacional, podendo flexibilizar o comércio do MERCOSUL, permitindo também o crescimento dos países vizinhos, a exportação e importação de produtos de portos de oceanos diferentes, gerando uma economia devida à volta necessária de um navio cargueiro pelo Cabo Horn, ou pelas elevadas tarifas do Canal do Panamá. Diversos fatores levaram à desagregação do modal ferroviário, dentre os quais pode-se citar: políticas públicas desorganizadas,

crises econômicas e falta de planejamento. Este último, em especial, gerou um sistema desigual, onde o uso de duas bitolas diferentes é o maior dos empecilhos técnicos para a integração do sistema.

As soluções para este problema são analisadas, buscando-se comprovar a utilização do eixo de bitola variável. Neste sentido, o objetivo principal desse trabalho é fornecer um estudo para a adaptação de eixos de bitolas variáveis nos trens em utilização no Brasil. Assim definida, esta solução gera uma série de restrições e alterações que devem ser consideradas no projeto deste sistema.

Tais restrições consistem em: gabarito de via - que mensuram dimensões máximas do material rodante e da via permanente, como raio de curvatura e tara - e valores inerentes à estabilidade do trem, como velocidade máxima de curva e superelevação. Estes parâmetros são calculados em função da medida da bitola, buscando alcançar o fator que melhor se adapte no caso do veículo que trafegue em ambas as vias. Cada tipo de vagão e de carga necessita de uma metodologia de estudo para aplicação desse sistema, e essa metodologia é o resultado desse trabalho.

O trabalho sugere uma metodologia de estudo para a implantação do sistema de bitola variável dividida em cinco partes. A primeira parte diz respeito à introdução e estudo do conteúdo. Nela, uma análise entre os modais de transporte é realizada, buscando comprovar a subutilização do sistema ferroviário brasileiro devido à falta de integração. Na segunda parte é apresentado um breve histórico que comprova a falta de planejamento no decorrer dos anos, gerando uma análise do sistema ferroviário para a obtenção dos problemas que resultam na utilização do sistema de duas bitolas diferentes da bitola adotada como padrão.

Na terceira parte são apresentadas as diversas opções para solucionar o problema das bitolas e a relação custo-benefício de cada uma, comprovando a viabilidade da adoção do trem de bitola variável.

A quarta parte trata das considerações e limitações presentes nos dois diferentes tipos de ferrovias brasileiras (bitolas de 1,000 m e de 1,600 m) e, com base em resoluções normativas de gabaritos de vias e componentes do material rodante, determina-se as dimensões restritivas de cada tipo de via. Os dados servem de base para o cálculo da estabilidade do trem.

A quinta parte apresenta os resultados advindos da metodologia de cálculo de estabilidade do trem, retirada da bibliografia deste projeto. Tomando-se um trem de carga padrão, analisam-se as alterações a serem adotadas para a adaptação dos vagões de carga ao eixo de bitola variável. Somente os vagões de carga serão considerados, pela possibilidade de uma padronização do modelo de truque utilizado, barateando o projeto e resultando numa ótima relação custo-benefício. O uso de locomotivas conjugadas nas duas extremidades do trem permite a passagem somente dos vagões adaptados, não sendo necessária (apesar de recomendável) a adaptação também na locomotiva.

A quinta parte apresenta um redimensionamento dos componentes do eixo de bitola variável que deve ser aplicado para a utilização no Brasil. Ao fim, apresentamos um layout básico e uma relação dos componentes para o funcionamento desse sistema.

1.2 Aspectos Gerais dos modais de transporte

Dentre os modais de transporte de cargas e passageiros disponíveis no Brasil, está o ferroviário. Este desperta muito interesse dos brasileiros, pois apesar de sermos de um país de proporções continentais, que necessitando portanto deste modal de transporte dessa característica, não conta com uma infraestrutura adequada para o desenvolvimento e utilização desse modal. O transporte ferroviário não é considerado o melhor no comparativo de eficiências de transporte, como pode ser ver pela tabela 1.1, mas nota-se que se for considerada a média entre estes, temos uma competição entre os modais rodoviários e ferroviários.

Tabela 1.1 - Comparativo de eficiências (FLEURY, 2001)

Comparativo de eficiência dos diferentes modais de transporte em ordem crescente					
Velocidade	Duto	Aquaviário	Ferrovári	Rodoviário	Aéreo
Consistência	Aéreo	Aquaviário	Ferrovári	Rodoviário	Duto
Capacidade	Duto	Aéreo	Rodoviári	Ferrovári	Aquaviário
Disponibilida	Duto	Aquaviário	Aéreo	Ferrovári	Rodoviário
Frequência	Aquaviári	Aéreo	Ferrovári	Rodoviário	Duto

A tabela 1.2 elaborado pela American Trucking Association (ATA, 2011) mostra a relação entre a distância dos pontos de coleta e descarga e o modal utilizado, ferroviário, rodoviário e janelas de competição nos Estados Unidos. Os Estados Unidos são utilizados como referência pois ele consta como o país com o maior desenvolvimento na área ferroviária.

Tabela 1-2 - Competição intermodal nos EUA (ATA, 2011)

Competição entre rodovia x ferrovia - Estados Unidos						
Distância (km)	Até 0,5 t	0,5-5,0 t	5,1 - 15,0 t	15,1 - 30,0 t	30,1-45,0 t	Acima de 45t
Abaixo de 180						
180-320						
320-480						
480-800						
800-1600						
1600-2400						
Acima de 2400						
Fonte: ATA	Rodovia	Ferrovia	Competição			

Pelo gráfico acima vemos que a distribuição de carga por meio de transporte é bem definida no caso estadunidense, com a rodovia sendo principalmente utilizada para transportes de curta e média distância e baixa e média capacidade. A ferrovia trabalha principalmente com grandes cargas e distâncias, resultando numa distribuição racional da carga entre os meios de transporte e resta uma ampla faixa intermediária, que pode ser atendida pelo transporte intermodal. Podemos concluir também pelo gráfico que a rodovia atua numa área maior que a ferrovia, mostrando que a competição entre os modais se dá de uma forma equilibrada na faixa de transição, mesmo com ambos os setores de transportes altamente desenvolvidos, e geralmente podemos observar uma maior utilização da rodovia que da ferrovia. O problema brasileiro é a predominância rodoviária onde teríamos um aproveitamento muito maior caso o meio utilizado fosse a ferrovia. Vemos na tabela 1.3 essa disparidade da utilização dos modais ferroviários e rodoviários no Brasil:

Tabela 1-3 - Competição intermodal no Brasil (DAVID. E. G, 1998)

Competição entre rodovia x ferrovia - Brasil						
Distância (km)	Até 0,5 t	0,5-5,0 t	5,1 - 15,0 t	15,1 - 30,0 t	30,1-45,0 t	Acima de 45t
Abaixo de 180						
180-320						
320-480						
480-800						
800-1600						
1600-2400						
Acima de 2400						

Este quadro mostra que o Brasil utiliza o modal rodoviário mesmo em cargas pesadas com grandes distâncias, devido principalmente pela falta de opções de meios de transporte. As ferrovias brasileiras não apresentam uma integração real, ou seja, que realmente possa ser utilizada com um trem de carga que pode passar por várias regiões do Brasil. Vemos que a utilização de ferrovias se restringe a cargas acima de 30 toneladas com uma curta ou média distância, e a competição abrange um patamar em que a rodovia leva vantagem.

O transporte por trens apresenta sua maior participação do mercado (cerca de 40%) na distância de 500 km, caindo para 10% na faixa de 800 km. Acima disso, continua perdendo espaço, atingindo uma participação praticamente nula nas distâncias superiores a 2.000 km, justamente onde deveria ser mais competitiva. Como a maiorias das ferrovias foram concebidas para exportação, especialmente de café, seguem quase sempre o trajeto norte-sul. O transporte entre o porto de Suape (BA) e Paulínia (SP), oferecidos pela Ferrovia Centro Atlântica passa por três ferrovias. O tempo de trânsito e a baixa

capacidade de transporte limitam o crescimento desta movimentação. Isso leva cargas provenientes do Nordeste e com destino ao Sul a percorrerem mais de 2.000 km de rodovias. A cabotagem poderia ser uma opção, enfrenta também problemas relacionados à ineficiência estrutural (FLEURY, 2001).

Analisando os nichos de competição entre os dois modais, verificamos que apesar do modal ferroviário ser notadamente mais eficiente em certas distâncias e cargas, o Brasil utiliza o modal rodoviário para o transporte, apresentando uma matriz de transporte desequilibrada. Após estudarmos a comparação entre o modal ferroviário e os demais, aprofundaremos agora no objetivo do projeto, caracterizando o modal ferroviário, desde suas origens na Europa no início do século XIX, à implantação das ferrovias no Brasil. Veremos que as origens dos problemas no Brasil não são relacionadas ao atraso na implantação das ferrovias, mas sim ao descuido gerado por políticas e a aspectos técnicos e econômicos. Apresentaremos o cenário atual, do Brasil e do mundo, buscando identificar problemas e soluções para a integração do sistema ferroviário brasileiro.

2. SISTEMA FERROVIÁRIO BRASILEIRO

Este capítulo apresenta uma análise do sistema ferroviário brasileiro, com seu histórico e situação atual para identificação dos problemas de integração presentes no país.

Após estudarmos a comparação entre o modal ferroviário e os demais, comprovando as vantagens e desvantagens de cada modal em relação ao outro, aprofundaremos agora no objetivo do projeto, caracterizando o modal ferroviário, desde suas origens na Europa no início do século XIX, à implantação das ferrovias no Brasil e todo o processo experimentado pelas ferrovias no Brasil e no Mundo. Veremos que as origens dos problemas no Brasil não são relacionados ao atraso na implantação das ferrovias, mas sim ao descuido gerado por políticas e a aspectos técnicos e econômicos. Apresentaremos o cenário atual, do Brasil e do mundo, buscando identificar problemas e soluções para a integração do sistema ferroviário brasileiro.

2.1 Origens das Ferrovias e das Locomotivas

O surgimento da ferrovia é um acontecimento paralelo à revolução industrial. Juntamente com o crescimento da produção mundial, foi necessária a evolução dos meios de transporte para acompanhar tal crescimento. Antes da criação das máquinas à vapor, já existiam carroças puxadas por animais de tração que rodavam sobre trilhos, permitindo um transporte da carga de forma mais uniforme e eficiente. Na Europa do século XVI, já havia diversos países europeus servindo-se de vias sobre trilhos. Essas vias destinavam-se, principalmente, ao transporte de carvão e minérios extraídos de minas subterrâneas. As vias de mineração eram construídas com dois trilhos de madeira que penetravam até o interior das minas. Grandes mineradores europeias e americanas contavam com veículos que andavam sobre trilhos utilizando a força gravitacional ou a animal para se locomover e utilizados para tracionar uma certa quantidade de vagões sobre estes trilhos. Utilizado como base para esse subcapítulo, o manual didático de ferrovias, (Borges Neto, 2010) apresenta que em meados do século XVIII, os mineiros começaram a revestir os trilhos de madeira com tiras de ferro, tornando-as mais resistentes e aumentando a durabilidade, e logo em seguida ferreiros ingleses deram início à fabricação de trilhos, compostos inteiramente de ferro. Os trilhos eram munidos de bordas para conduzi-los os vagões com rodas comuns de carroções. No final do século XVIII, os ferreiros estavam produzindo trilhos, inteiramente, de ferro, sem bordas que eram utilizados para conduzir vagões dotados de rodas com bordas ressaltadas. Nesse período as máquinas à vapor estavam no seu auge (lembrando que James Watt trabalhava com elas em meados de 1770). No início do século XIX, o inventor inglês Richard Trevithick, construiu a primeira

máquina capaz de aproveitar altas pressões de vapor, para girar um eixo trator. Montou-a sobre um chassi de quatro rodas, projetado para deslocar-se sobre trilhos. Em 1804, Trevithick fez uma experiência com este veículo, puxando um vagão carregado com 9 toneladas de carvão, por uma via de trilhos com 15 km de extensão. Esta foi a primeira locomotiva bem sucedida do mundo. Em 1813, a locomotiva a vapor foi apresentada à população da Inglaterra com o Puffing Billy (Figura 2.1) construído pelo engenheiro inglês William Hedley. A partir daí, então, começou a busca pelo desenvolvimento das ferrovias e locomotivas.

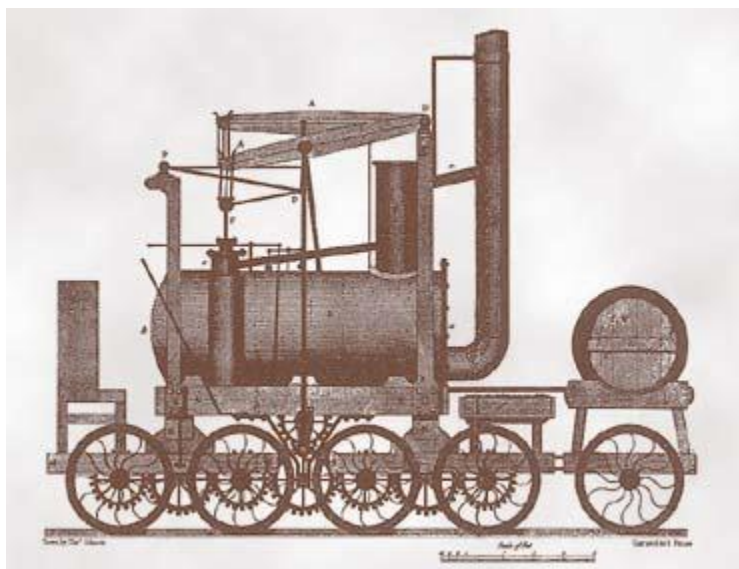


Figura 2.1 - Puffing Billy

Em 1824, George Stephenson, um construtor inglês de locomotivas a vapor, venceu o concurso de velocidade para locomotivas, construindo a famosa locomotiva conhecida como “The Rocket”. Finalmente, em 1825, o mesmo George Stephenson construiu a primeira ferrovia pública do mundo, ligando Stockton a Darlington, cobrindo uma distância de 32 km, tornando-se a ferrovia pioneira em trens de carga e com horários regulares de transporte. Citando Borges Neto, foi Stephenson quem primeiro identificou a necessidade de que as ferrovias de um país possuíssem uma bitola padronizada. A bitola adotada nas ferrovias por ele construídas (1,435 m), correspondia ao comprimento dos eixos das diligências hipo-tracionadas (cavalos e mulas) existentes na época (4’ 8 ½”), não havendo, ao que se saiba, outra justificativa técnica, para sua adoção. Em 1907, na Conferência Internacional de Berna (Suíça), esta bitola foi consagrada como “Bitola Internacional” e hoje é adotada na maioria das ferrovias européias, norte-americanas e canadenses.

A construção de ferrovias difundiu-se rapidamente para todo o continente europeu. Em meados de 1870, a base atual rede ferroviária da Europa, já havia sido construída, com linhas principais e auxiliares

sendo construídas durante o final do século XIX e princípio do século XX. Algumas destas linhas exigiram a construção de túneis através dos Alpes, para ligarem a França à Itália. O Túnel Simpson, que une a Itália à Suíça, foi concluído em 1906 e com 20 km de extensão, é ainda um dos maiores túneis ferroviários do mundo. É interessante lembrar que no Brasil, o Túnel da Mantiqueira, na Ferrovia do Aço, trecho Jeceaba – Itutinga – Volta Redonda, no Município de Bom Jardim de Minas, ao sul de Minas Gerais, com 8.645 m, é o maior túnel da Ferrovia do Aço e da América Latina.

Já no século XIX os países europeus começavam a construir ferrovias em suas colônias. Somente a Inglaterra construiu mais de 40 mil km de ferrovias na sua colônia mais próspera, a Índia, no final deste mesmo século, na mesma época da construção da maior linha ferroviária construída, a Transsiberiana, com seus mais de 9000 km de extensão (em azul na Figura 2.2), sendo concluída em 1916. A Austrália deu início aos trabalhos de construção de uma ferrovia através das planícies do sul do país, em 1912. A linha, concluída em 1917, estendeu-se por 1.783 km, ligando Port Pirie, na Austrália do Sul, a Kalgoorlie, na Austrália Ocidental.

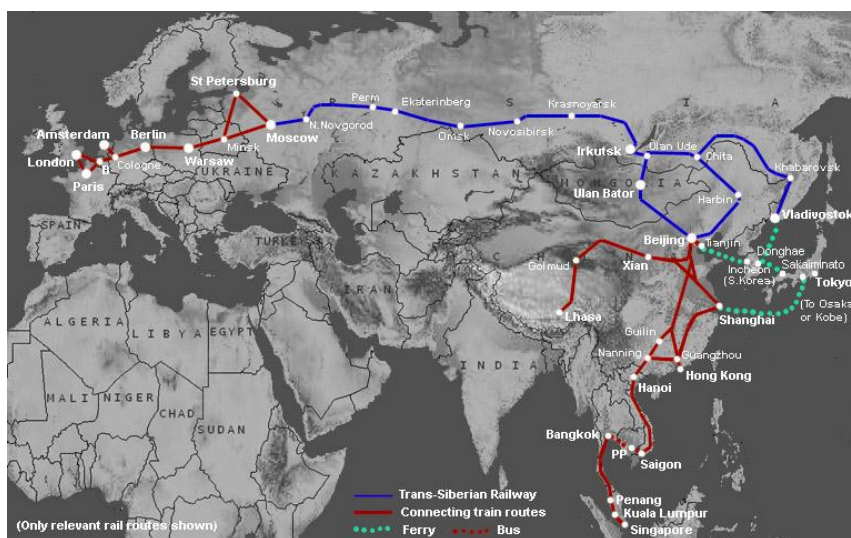


Figura 2.2 - Ferrovia Transiberiana

Com extensões cada vez maiores de linhas ferroviárias, a busca por locomotivas de maior potência tornou-se foco de muitos engenheiros. No final do século XIX, muitos trens já desenvolviam de 80 a 100 km/h. Neste período, já eram projetadas locomotivas elétricas. Em 1895 a Baltimore & Ohio Railroad colocou em operação um trem elétrico através de um túnel de 5.600 m por baixo da cidade de Baltimore. Esta foi então a primeira empresa ferroviária a empregar a locomotiva elétrica em serviços ferroviários. Muitas ferrovias européias eletrificaram suas linhas principais, a partir do século XX.

Depois da metade do século XIX, as Ferrovias foram introduzindo o uso do aço na fabricação de trilhos e vagões. Os trilhos de aço notadamente tinham uma resistência muito superior aos de madeira, resistindo cerca de 20 vezes mais, e assim foi iniciada a substituição dos trilhos de madeira por inteiriços de aço. Os primeiros vagões de carga ou de passageiros tinham estruturas frágeis, basicamente, de madeira. Os vagões de passageiros, fabricados, inteiramente, de aço, entraram em serviço regular, em 1907 e logo substituíram a maioria dos carros de madeira. Os primeiros vagões de carga totalmente de aço entraram em circulação já em 1896. No final da década de 1920, eles já haviam praticamente substituído os vagões de madeira.

As primeiras ferrovias sofriam com falta de segurança e alto índice de acidentes. Em George Westinghouse, patenteou o Freio a Ar. Com estes freios, os trens poderiam reduzir a velocidade ou parar muito mais rapidamente do que com os freios manuais utilizados anteriormente. Em 1873, outro inventor norte-americano, Ely Janney, patenteou um Dispositivo de Engate de Vagões automático. Antes da invenção de Janney, a operação de engate era realizada manualmente. Muitos empregados, encarregados da operação dos freios e chaves perderam dedos e mãos, enquanto engatavam vagões.

A construção de linhas de telégrafos elétricos na metade do século XIX tornou possível o Sistema de Sinalização por Zona. Os sistemas manuais tornaram-se comuns antes do final do século. Em 1872, o engenheiro norte-americano William Robinson, patenteou o Circuito de Linha, usado em sistemas de sinalização automáticos. Os circuitos de linha, porém só foram, amplamente, empregados depois de 1900.

Enquanto isso, um número crescente de pessoas viajava de trem. As próprias ferrovias procuravam atrair os passageiros. Em 1867, um inventor e homem de negócios norte-americano, George Pullman, começou a fabricar um Vagão Dormitório que inventara no final da década de 1850. Outros vagões dormitório já se encontravam em uso antes do de Pullman entrar em serviço, mas este obteve uma aceitação muito maior que a dos demais. Por volta de 1875, cerca de 700 vagões dormitórios Pullman, circulavam nos Estados Unidos da América e em outros países. As ferrovias introduziram, também, luxuosos vagões restaurante e vagões salão, para atendimento aos viajantes.

A medida que distâncias maiores passaram a ser cobertas por redes de ferrovias e a competição com outros meios de transporte (hoje, chamados de modais), tornou-se mais acirrada. Assim foi que começaram a ser desenvolvidos projetos de linhas e composições capazes de superar os 200 km/h, em meados do século XX. Hoje, existem exemplos de Trens de Alta Velocidade em, praticamente, todos os países que usam extensivamente o transporte ferroviário:

- ICE (Alemanha): 250 km/h;
- TGV - Train a Grande Vitesse (França): 320 km/h;
- EUROSTAR (Reino Unido): 300 km/h;

- AVE – Alta Velocidade Espanhol (Espanha): 300 km/h;
- TALGO (Espanha): 220 km/h;
- SHINKANSEN – Trem Bala (Japão): superiores a 300 km/h.

2.2 A Ferrovia no Brasil – Histórico

No Brasil, as primeiras iniciativas nacionais relativas à construção de ferrovias remontam ao ano de 1828, quando o governo Imperial autorizou por Carta de Lei a construção e exploração de estradas em geral, tendo como propósito, a interligação das diversas regiões do País. A primeira tentativa de implantação de uma ferrovia deu-se em 1835, quando o Regente Diogo Antônio Feijó, promulgou uma Lei, concedendo favores a quem quisesse construir e explorar uma estrada de ferro ligando o Rio de Janeiro, capital do Império, às capitais das Províncias de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Bahia. Não apareceu, na ocasião, interessado em tão arriscada empreitada. Em 1836, a Província de São Paulo (que nesta época, ainda incluía a Comarca de Curitiba), estabeleceu um plano de viação, concedendo o direito de construção e exploração a uma companhia que quisesse construir ligações ferroviárias entre suas principais cidades (Sorocaba, Santos, Curitiba). Foi, também, frustrada esta tentativa. Em 1840, o médico inglês Thomas Cockrane, obteve concessão para fazer a ligação entre Rio de Janeiro e São Paulo, com vários privilégios, que também não obteve êxito. Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, depois, Barão de Mauá, quase que apenas por sua conta e risco, construiu a ligação entre o Porto de Mauá (interior da Baía da Guanabara) e a Raiz da Serra (Petrópolis). Assim, em 1854, foi inaugurada a primeira Estrada de Ferro do Brasil, com 14,5 km de extensão (em bitola de 1,63 m) que foram percorridos em 23 minutos, a uma velocidade média de 38 km/h, por uma composição tracionada pela locomotiva “A Baroneza”, nome este, dado em homenagem à esposa do, agora, Barão de Mauá. Após a inauguração da Estrada de Ferro Mauá, sucederam-se as seguintes ferrovias, todas em bitola de 1,60 m:

Tabela 2-1 - Ferrovias e datas de inauguração (BORGES NETO, 2010)

Ferrovia	Data da Inauguração
Recife ao São Francisco	08/02/1858
D. Pedro II	29/03/1858
Bahia ao São Francisco	28/06/1860
Santos a Jundiaí	16/02/1867

A segunda estrada de ferro, que ligaria Recife ao rio São Francisco não chegou a ser concluída.

A Companhia Estrada de Ferro D. Pedro II, com trecho inicial de 47,21 km, ligava a Estação da Corte a Queimados, no Rio de Janeiro. Esta ferrovia se constituiu em uma das mais importantes obras da engenharia ferroviária do País, superando os 412 metros de altura da Serra do Mar, com a realização de colossais cortes, aterros e perfurações de túneis, entre os quais o Túnel Grande com 2.236 m de extensão, na época o maior do Brasil, aberto em 1864.

A Estrada de Ferro D. Pedro II foi organizada em 1855, também, pelo próprio Barão de Mauá e deu origem em 1889, à Estrada de Ferro Central do Brasil (BORGES NETO, 2010).

Um dos fatos mais importantes na história do desenvolvimento ferroviário no Brasil foi a ligação Rio – São Paulo, unindo as duas mais importantes cidades do país, no dia 8 de julho de 1877, quando os trilhos da Estrada de Ferro São Paulo (inaugurada em 1867), uniram-se com os da E. F. D. Pedro II. Até o final do século XIX, outras concessões foram outorgadas, agora na bitola métrica, entre elas, destacando-se as seguintes:

Tabela 2-2 - Ferrovias e datas de inauguração II (BORGES NETO, 2010)

Ferrovia	Data
Companhia Mogiana	03/05/1875
Companhia Sorocabana	10/07/1875
Central da Bahia	02/02/1876
Santo Amaro	02/12/1880
Porto Alegre a Novo Hamburgo	14/04/1884
Dona Tereza Cristina	04/09/1884
Corcovado	09/10/1884
Paranaguá a Curitiba	02/02/1885.

Essa alternância de bitola foi uma solução apresentada para uma economia na construção de ferrovias, já que na bitola de 1 metro os dormentes têm sua dimensão reduzida se comparada às bitolas em utilização, gerando uma economia não só de material, mas também de mão de obra, pois a abertura de estrada se tornava mais estreita e de preparação de terreno (marginais com dimensões inferiores). Identificamos aqui então outro surgimento do problema ferroviário brasileiro.

Ainda de acordo com Manuel Borges Neto (BORGES NETO, 2010) a evolução das construções ferroviárias no Brasil pode ser dividida em três fases distintas:

1ª Fase: Anterior à 2ª Grande Guerra, caracterizada por ter a maioria de suas linhas construídas e exploradas por concessões a empresas estrangeiras e também, por serem as construções feitas, manualmente e com utilização de “galeotas” tracionadas por tropas de muares, nos trabalhos de terraplenagem.

2ª Fase – Durante a 2ª Grande Guerra quando foram introduzidas as primeiras máquinas de terraplenagem, sendo que os movimentos de terra mecanizados permitiram a construção de linhas mais adequadas em termos geométricos;

3ª Fase – Após a 2ª Grande Guerra, caracterizada pelo uso generalizado de máquinas de terraplenagem, introdução da ciência da Mecânica dos Solos e dos levantamentos aerofotogramétricos, o que possibilitou a construção de linhas geometricamente mais adequadas e com plataformas de melhor capacidade de suporte, com melhor opção de traçado e custos mais otimizados.

Tabela 2-3 - Crescimento das Estradas de Ferro no Brasil (BORGES NETO, 2010)

PERÍODO	TOTAL CONSTRUÍDO	ACUMULADO
- de 1854 a 1873	498 km	498 km
- de 1874 a 1913	23.485 km	23.983 km
- de 1914 a 1933	8.459 km	32.442 km
- de 1934 a 1943	1.698 km	34.140 km
-de 1944 a 1953	2.248 km	36.388 km

Vemos pela tabela acima, retirada de Borges Neto (2010) o ritmo de construção das ferrovias brasileiras. Em 1922, ao se celebrar o 1º Centenário da Independência do Brasil, existia no País um sistema ferroviário com, aproximadamente, 29.000 km de extensão, cerca de 2.000 locomotivas à vapor e 30.000 vagões em tráfego. Em 1930, introduzida a tração elétrica no Brasil, para substituir, em determinados trechos, a tração a vapor e em 1939 iniciou-se a substituição da tração a vapor pela diesel elétrica, processo esse interrompido durante a Segunda Guerra Mundial e intensificado na década de 1950 (BORGES NETO, 2010).

Atualmente, o Brasil conta com uma malha ferroviária de cerca de 29.000 km de extensão. Então, a priori, estranhamos o fato de até 1953 termos mais de 36.000 km construídos. Esse decréscimo é devido ao fato de que, durante o período de ditadura no país, vários trechos considerados anti-econômicos foram desativados. Além desse fato, vemos que após a segunda guerra, o crescimento ferroviário não continuou tão expressivamente como no período anterior. Esse alto crescimento no início do século foi devido ao aproveitamento de materiais e componentes vindos da Europa, que já contava com um padrão internacional de bitola adotado, de 1,435 m. Assim, o Brasil importou material advindo de diversos países, adotando bitolas de largura de 1,600 m (irlandesa), 1.000 m (Espanha), 0.762 m (Portugal), entre outros. Outro fator acarretou no decréscimo do investimento em ferrovias após a segunda guerra, foi a concorrência pela rodovia, onde o governo investiu pesado na infra-estrutura viária, principalmente na era Washington Luis, com o lema. “Governar, é abrir estradas”.

Podemos então concluir, que esta falta de planejamento quanto à construção das ferrovias no Brasil, resultou nos seguintes problemas do sistema ferroviário nacional:

Grande diversidade de bitolas que dificultam a integração entre ferrovias;

Traçados de estradas de ferro excessivamente sinuosos e extensos;

Estradas de ferro distribuídas pelo País, de forma dispersa e isolada.

Esta fase das empresas ferroviárias privadas e independentes entre si perdurou até o final da década de 1930, quando o Governo ditatorial de Getúlio Vargas iniciou um processo de saneamento e reorganização das estradas de ferro e promoção de investimentos, pela encampação de empresas estrangeiras e nacionais, inclusive estaduais que se encontravam em má situação financeira. Assim, foram incorporadas ao patrimônio da União várias estradas de ferro, cuja administração ficou a cargo da Inspetoria Federal de Estradas – IFE, órgão do Ministério de Viação e Obras Públicas, encarregado de gerir as ferrovias e rodovias federais (BORGES NETO, 2010).

Esta Inspetoria deu origem, posteriormente, ao Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER e ao Departamento Nacional de Estradas de Ferro – DNEF, sendo este último, criado pelo decreto Lei nº 3.155, de 28 de março de 1941. O DNEF foi extinto em dezembro de 1974 e suas funções foram transferidas para a Secretaria-Geral do Ministério dos Transportes e parte para a Rede Ferroviária Federal S. A. – RFFSA.

- A encampação das estradas de ferro pela União teve como principais objetivos:
- evitar a brusca interrupção do tráfego ferroviário;
- prevenir o desemprego;
- propiciar a melhoria operacional, objetivando a reorganização administrativa e a recuperação de linhas e material rodante.

No início da década de 1950, o Governo Federal, com base em amplos estudos decidiu pela unificação administrativa das 18 empresas ferroviárias pertencentes à União que totalizavam 37.000 km de linhas espalhadas pelo território nacional.

Em 16 de março de 1957 foi criada pela Lei nº 3.115 a sociedade anônima Rede Ferroviária Federal S.A. – RFFSA, com a finalidade de administrar, explorar, conservar, reequipar, ampliar e melhorar o tráfego das estradas de ferro da União a ela incorporadas, cujos trilhos atravessavam todo o país, servindo as regiões Nordeste, Sudeste, Centro-Oeste e Sul, padronizando os procedimentos e visando eliminar os grandes déficits que o sistema produzia (BORGES NETO, 2010).

Em 1969, as ferrovias que compunham a RFFSA foram agrupadas em quatro sistemas regionais:

Sistema Regional Nordeste, com sede em Recife;

Sistema Regional Centro, Com sede no Rio de Janeiro;

Sistema Regional Centro-Sul, com sede em São Paulo;

Sistema Regional Sul, com sede em Porto Alegre.

Em novembro de 1971, pela Lei nº 10.410/SP, o governo do Estado de São Paulo, seguindo o mesmo critério, decidiu unificar em uma só empresa, as cinco estradas de ferro de sua propriedade. Naquela época, pertenciam ao Estado de São Paulo a Companhia Paulista de Estradas de Ferro, Estrada de Ferro Sorocabana, Estradas de Ferro Araraquara, Companhia Mogiana de Estradas de Ferro e Estradas de Ferro São Paulo-Minas. Em decorrência desta junção, foi criada a FEPASA – Ferrovia Paulista S.A., para gerir, aproximadamente, 5.000 km de vias férreas.(CNT, 2010)

Na década de 1970, dentro do programa de saneamento financeiro com a erradicação dos ramais antieconômicos, a RFFSA, estava contando com apenas 24.000 km de linhas e a malha brasileira com 30.500 km. Assim, em menos de 20 anos nossas ferrovias perderam cerca de 7.000 km de linhas. O período áureo da RFFSA foi entre os anos de 1975 a 1984, quando foi modernizado, principalmente, o sistema suburbano do Grande Rio que adquirindo material rodante japonês da mais avançada tecnologia para a época chegou a transportar cerca de 1,5 milhões de passageiros/dia. Também, no segmento de cargas o material rodante, tanto de tração quanto de transporte, foi grande parte modernizado, com aquisição de mais de 30.000 vagões e de aproximadamente 1.800 locomotivas, dos mais variados modelos (BORGES NETO, 2010).

Neste período, a via permanente, as obras de arte e os sistemas de comunicação e sinalização, também passaram por grandes reformas e atualização, retrocedendo apenas a eletrificação das linhas.

Em 1976, foi feita nova reestruturação na empresa federal, sendo criadas pela RFFSA as Superintendências Regionais – SRs, em número de 10, posteriormente, ampliado para 12, com atividades orientadas e coordenadas por uma Administração Geral, sediada no Rio de Janeiro.

Já a partir de 1980, os sistemas ferroviários da Rede Ferroviária Federal S.A (RFFSA) e à Ferrovia Paulista S.A. – FEPASA começaram a ser afetados, quando os investimentos reduziram-se substancialmente, atingindo, na RFFSA em 1989, por exemplo, apenas 19% do valor aplicado na década de 1980. Assim, em 1984, a empresa viu-se impossibilitada de gerar recursos suficientes à cobertura dos serviços da dívida contraída. A RFFSA passou a suportar sério desequilíbrio técnico-operacional, decorrente da degradação da infra e da superestrutura dos seus principais segmentos de bitola métrica e da postergação de manutenção de material rodante que vieram a ocasionar expressiva perda de mercado para o modal rodoviário.

Medida de ajustamento institucional foi então tomada pelo Governo Federal, com afastamento da RFFSA dos transportes urbanos. O Decreto nº 89.396, de 22/02/1984, constituiu a Companhia Brasileira de Transporte Urbano – CBTU, a partir da extinta ENGEFER, antes encarregada da construção da Ferrovia do Aço, a qual ficou responsável pela prestação daqueles serviços. Note-se que estes, na maioria dos casos, são até hoje, altamente deficitários. Assim, devido à escassez de recursos para financiar os investimentos do setor de transportes, inclusive para o aumento da oferta e melhoria de serviços, o Governo Federal, na década de 90, colocou em prática ações voltadas para a privatização, concessão e delegação de serviços públicos de transporte a estados, municípios e iniciativa privada (BORGES NETO, 2010).

Por meio da Lei n.º 8.031/90, de 12/04/90, o Governo Federal instituiu o Programa Nacional de Desestatização - PND, do qual o setor ferroviário passou a integrar, a partir da inclusão da extinta RFFSA, pelo Decreto n.º 473, de 10/03/92. As ações do PND neste setor tiveram como principais objetivos:

- desonerar o Estado;
- melhorar a alocação de recursos;
- aumentar a eficiência operacional;
- fomentar o desenvolvimento do mercado de transportes;
- melhorar a qualidade dos serviços.

Conforme o Manual didático de ferrovias, o processo de desestatização da RFFSA, foi realizado com base na Lei nº 8,987/95, (Lei das Concessões). Ela foi efetivada por meio de leilões públicos, conforme definido nos editais de licitação de sete malhas da empresa, com a finalidade de conceder ao setor

privado o direito de exploração dos serviços públicos de transporte ferroviário de cargas. Esta lei estabeleceu os direitos e obrigações para as partes envolvidas no processo de concessão, por um período de 30 anos, prorrogáveis por mais 30, definindo ainda, o princípio da manutenção do equilíbrio econômico e financeiro e os direitos dos usuários. O processo obedeceu a seguinte cronologia (BORGES NETO, 2010).

Tabela 2-4 -Privatização ferrovias (BORGES NETO, 2010)

Regionais	Data do Leilão	Concessionárias	Início de Operação	Extensão (km)
Oeste	05.03.1996	Ferrovia Novoeste S.A.	01.07.1996	1.621
Centro-Leste	14.06.1996	Ferrovia Centro-Atlântica S.A	01.09.1996	7.080
Sudeste	20.06.1996	MRS Logística S.A.	01.12.1996	1.674
Tereza Cristina	26.11.1996	Ferrovia Tereza Cristina S.A.	01.02.1997	164
Nordeste	18.07.1997	Cia Ferroviária do Nordeste	01.01.1998	4.238
Sul	13.12.1996	Ferrovia Sul-Atlântico S.A. – atualmente – ALL.	01.03.1997	6.586
Paulista	10.11.1999	Ferrovia Bandeirantes S.A.	01.01.1999	4.236

2.3 A Ferrovia no Brasil – Cenário Atual

De forma abrangente, considerando-se as empresas que dedicam-se ao transporte de cargas e passageiros, por via férrea, o mapa da figura 2.3 mostra o panorama do sistema ferroviário brasileiro.

Em comparação com outros países, o Brasil conta com a décima posição em extensão de malha ferroviária figura 2.4 (dados atualizados até 2009 de acordo com a CIA World Factbook) (CIA, 2009)

Como podemos ver pelo gráfico 2.4, a apesar da décima posição em ferrovias construídas, para uma razão de ferrovias por área do território, o Brasil tem uma baixíssima densidade de ferrovias. Isso também deve-se ao fato de, apesar de contar com pouco mais de 28.000 quilômetros, o Brasil não utiliza todo o seu potencial ferroviário. Muitos trechos estão interditados e muitos outros foram considerados economicamente inviáveis.

Tabela 2-5 - Dados das ferrovias por país e região (FERRONORTE, 2006)

Países Continentais	Extensão mil km	Área milhões km ²	Densidade km/10 ³ km ²	Países Europeus	Extensão mil km	Área milhões km ²	Densidade km/10 ³ km ²
Estados Unidos	309	9,4	32,8	Bélgica	3,6	0,03	120,0
Argentina	34	2,8	12,4	Alemanha	27,3	0,25	109,2
ex-União Soviética	145	22,4	6,5	Suiça	2,9	0,04	72,5
Canadá	81	10	6,4	Holanda	2,8	0,04	70,0
China	51	9,5	5,4	Inglaterra	16,6	0,25	66,4
Austrália	41	7,7	5,3	Austria	5,3	0,08	66,3
Brasil	29	8,5	3,4	Dinamarca	2,5	0,04	62,5
				França	34,3	0,55	62,4
				Itália	16,0	0,3	53,3
Estados do Brasil				Portugal	3,6	0,09	40,0
São Paulo	5,0	0,25	20,0	Irlanda	1,9	0,07	27,1
Santa Catarina	1,2	0,09	13,3	Espanha	12,5	0,51	25,0
Santa Catarina	0,6	0,09	6,7*	Grécia	2,6	0,13	20,0

*Sem as linhas desativadas

Com esses indicadores mostrando a fragilidade do transporte brasileiro, é de se esperar que os investimentos para as ferrovias aumentem após tanta discussão. Porém a situação continua precária.

De acordo com o governo, que disponibiliza todos os dados do PAC – programa de aceleração do crescimento, os investimentos destinados a ferrovia somam pouco mais de 2,5 bilhões de reais (exceto o projeto do TAV brasileiro, que sozinho tem uma previsão de 33 bilhões de reais, que construiriam uma malha brasileira de aproximadamente 33.000 km de ferrovias), originário praticamente de empresas privadas, enquanto que o investimento nas rodovias, seguindo o planejamento feito pelo presidente Washington Luís, prevê um investimento de pouco mais de 42 bilhões de reais dos cofres públicos. É fato que as decisões políticas não colaboram para a integração da malha ferroviária brasileira.

2.4 Corredores e Concessionárias

O sistema brasileiro pode ser basicamente dividido em corredores de carga, sendo doze deles concedidos, onze à iniciativa privada e uma a uma empresa pública. Duas malhas locais são classificadas como industriais particulares, e uma malha é operada pelo estado do Amapá. (LIMA, 2002). Os

principais corredores brasileiros são os corredores Centro-Oeste - São Paulo; Rio – São Paulo, Santos (Bitola estreita e larga), Rio – Belo horizonte e Vitória. A avaliação dos corredores de carga pode ser visto no relatório anual de ferrovias da Confederação Nacional da Indústria Abaixo, o mapa com os corredores identificados:



Figura 2.5 - Corredores ferroviários

2.5 Material Rodante

O material rodante pode ser classificado em dois tipos: de tração (locomotivas) e de carga (vagões). O Brasil possui uma boa indústria de material rodante, principalmente de vagões de carga, mas conta com uma maioria de locomotivas ultrapassadas e ineficientes.

As concessionárias começaram a adquirir locomotivas, novas e usadas, e o parque ferroviário brasileiro começou a se recompor do déficit gerado pela falta de investimento ao longo dos anos, resultando em um aumento no transporte ferroviário de carga. A maioria das locomotivas utilizadas no Brasil são Diesel Elétricas. Nas locomotivas diesel-elétricas o motor diesel aciona um gerador que produz a energia elétrica destinada aos motores de tração localizados nos truques e acoplados às rodas motrizes por engrenagens. Especialmente a partir da década de 1970 passou-se a utilizar o alternador, produzindo corrente alternada a ser retificada e enviada aos motores de tração de corrente contínua, sendo amplamente utilizada no Brasil desde então. Uma tecnologia mais recente é a dos motores de tração de corrente alternada já comum em diversas ferrovias da América do Norte, mas ainda não utilizada no Brasil.

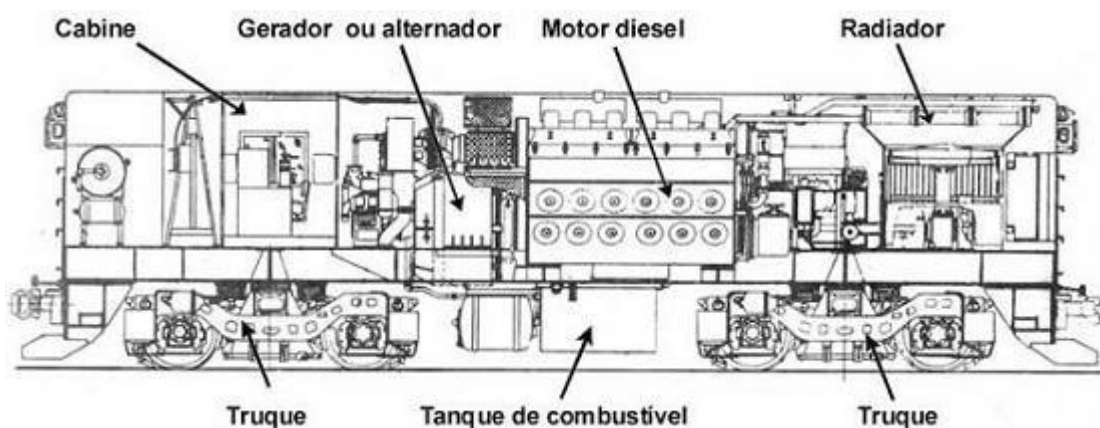


Figura 2.6 - Planta Locomotiva Diesel-Elétrica (ANTF, 2011)

De acordo com o arranjo das rodas nos truques as locomotivas têm uma classificação, atribuindo-se letra às rodas motrizes e número às rodas livres sem tração. Esta classificação também se aplica às locomotivas elétricas.

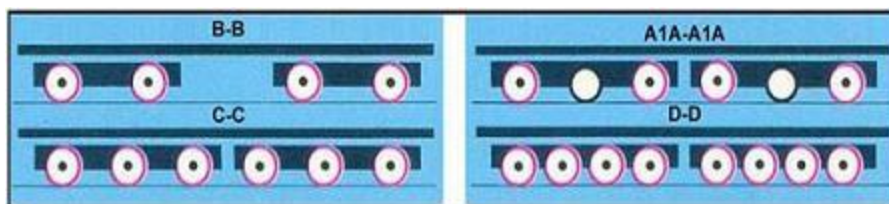


Figura 2.7 - Principais classificações das locomotivas (ANTF, 2011)

Recentemente, duas máquinas desenvolvidas por brasileiros começaram a receber as primeiras encomendas e a frequentar nossos trilhos rebocando passageiros ou cargas. Uma locomotiva diesel-hidráulica batizada de DH10 e projetada pela engenharia da Amsted Maxion. A outra de nomenclatura EIF-1000: uma diesel-elétrica desenvolvida na EIF Engenharia.

2.6 Bitolas Ferroviárias

O Brasil apresenta um quadro de 5 bitolas diferentes. A malha de maior extensão é a bitola de 1,000 metro, apelidada de bitola métrica, com praticamente 78% do total. A bitola larga, com 1,600 metro é a segunda mais usada, e está presente somente na região Sudeste e parte do Centro-Oeste (linha mais grossa no mapa ao lado) e na Estrada de Ferro Carajás.



Figura 2.8 - Corredores de bitola larga e estreita Sudeste (ANTF, 2011)

As diferenças das bitolas serão discutidas com mais profundidade no próximo capítulo, mas pode-se ver claramente que a região de maior importância industrial do país tem uso de duas bitolas diferentes, e em certos casos, como no interior de São Paulo e Minas Gerais, a mobilidade dos trens fica restrita.

2.7 Interligações dos Corredores Nacionais

Mesmo a bitola métrica representando pouco mais de 78% de toda a malha ferroviária brasileira, as dificuldades originadas pelas diferenças de bitolas somadas às regras de tráfego mútuo e direito de passagem, acréscimos tarifários, intercâmbio de material rodante, restrições de abastecimento, manutenção e troca de equipagem, influenciam negativamente no fluxo entre as concessionárias.

Em uma entrevista ao Doutor em logística Silvio dos Santos, ele cita que a unificação das bitolas no Brasil é praticamente inviável. “A unificação de bitola é impossível, pois a maior parte das ferrovias brasileiras é de bitola de 1,00 m, 78 %, e transformar essa bitola em larga, 1,60 m, é difícil e cara, pois seria necessário alargar todas as pontes, viadutos, passagens inferiores e túneis. Na larga é fácil colocar o 3º trilho, pois ele vai por dentro dos trilhos da larga e não existirá problemas de gabarito”. Corroborando o comentário acima, no Brasil existem cerca de 22.000 passagens de níveis, centenas de pontes e viadutos e túneis que teriam de ser reconstruídos para um aumento da bitola.

Newton de Castro, em seu trabalho “Estrutura, desempenho e perspectiva do transporte ferroviário de carga”, de 2002, mostrava que apenas 3,5% do tráfego ferroviário representava o intercâmbio entre as concessionárias:

“De todas as malhas, somente a Ferrobán apresenta um intercâmbio mais significativo, em função da própria configuração de sua malha, como continuação das concessões limítrofes. Em seguida, destacam-se a Novoeste e a Ferrovia Centro Atlântica (FCA), muito embora com percentuais de intercâmbio já bem limitados, ante os mais de 70% de países como os EUA. Observa-se também o alto grau de fechamento das ferrovias controladas pelos próprios usuários, no caso EFVM e a MRS, muito embora sejam estas as linhas de conexão dos Estados que constituem o “coração” econômico do País”.

Em 2007, essa situação persiste, apesar das novas aquisições da ALL (Ferrobán, Novoeste e Ferronorte), pois as dificuldades de circulação norte-sul em bitola estreita são grandes. Todo o fluxo do sul para o leste de São Paulo, Zona da Mata de Minas Gerais e o Rio de Janeiro, um grande centro consumidor da Região Sudeste, tem que ser transbordado no Terminal de Tatuí da ALL. No sentido contrário, o mesmo procedimento ocorre propiciando a atuação forte dos caminhões em cargas tipicamente ferroviárias como os produtos siderúrgicos (Santos, 2011).

A mesma dificuldade ocorre com os trens da FCA que ligam o pólo industrial da Bahia à Campinas (Paulínia), os quais têm que circular pela antiga Mogiana, via Triângulo Mineiro, trajeto que torna o percurso ferroviário muito longo em relação a rodovia. Ou seja, apesar dos terminais de transbordo e da existência do terceiro trilho em diversos trechos da malha, a rica região atendida pela bitola larga é pouco acessível para os trens de bitola estreita. É interessante também ressaltar que para longas distâncias, a participação do modal ferroviário no Brasil diminui bastante, com a ferrovia perdendo mercado para os outros modais de transporte, de acordo com a revista Harvard Business School, edição de janeiro de 2004, que relata a privatização da ferrovia brasileira e em especial o desempenho da América Latina Logística – ALL (Santos, 2011).

Portanto, devido a diferenças de bitolas e a divisão da malha por concessionárias regionais, a participação da ferrovia no mercado de transporte de carga é maior nas curtas distâncias, que apesar de um sucesso das empresas, se mostra ineficiente frente à um concorrido mercado de frete em outros

modais, nas quais as vantagens comparativas de custo e de serviço desse modal são mais limitadas. Ou seja, como disse Newton de Castro: “os fluxos ferroviários são ainda fortemente limitados pelas fronteiras geográficas das concessões”.

A ferrovia Norte –Sul, que planeja interligar Belém-PA a Brasília-DF, conectando-se a malha da Ferrovia Centro Atlântica, atualmente está sendo construída em bitola larga. Por todo o seu caminho, que passa pelo sul do Maranhão, estado do Tocantins e parte de Goiás, a ferrovia tem uma interligação com a malha da E.F Carajás e pretende uma interligação com as malhas ferroviários nordestinas. Porém, tanto essas malhas, quanto a malha presente no ponto de encontro em Brasília são de bitolas métricas. Portanto, para uma mobilidade total, é prevista uma futura construção de um terceiro trilho sobre a ferrovia. Essa solução está sendo a mais comumente utilizada, porém somente tem sido adotada em trechos com distâncias muito inferiores ao planejamento da ferrovia Norte-Sul. Portanto, deve ser feita uma análise de viabilidade econômica para este caso.

2.6 Interligação da Malha Ferroviária Sul-Americana

O Brasil tem conexão ferroviária internacional com três países (representados por um ‘i’ circunscrito em amarelo no mapa abaixo): Argentina, Bolívia e Uruguai. Dessas três conexões apenas a da Bolívia tem a mesma bitola dos dois lados da fronteira.



Figura 2.9 - Ligações internacionais – (ALAF, 2004)

A conexão com a Bolívia em bitola de 1,000 m é na fronteira de Corumbá, Mato Grosso do Sul, com Porto Suares em Quijarro (Arroyo Concepcion) na linha da antiga Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, atual Novoeste (ALL). Do lado boliviano a linha permite chegar a Santa Cruz de la Sierra, a Montero (ao norte) e a Yacuiba (ao sul) na fronteira com Pocitos (Argentina) também com bitola métrica. Entretanto, o acesso para toda malha ferroviária boliviana, com aproximadamente 3.500 km, não é possível, pois, não existe conexão com a linha que atende Sucre e La Paz. Uma das ferrovias bolivianas, é a Ferrocarriles Oriental S. A., a qual atua no transporte de carga e passageiros na malha leste, que inclui a ligação Santa Cruz a Quijarro. (Santos, 2011).

A outra ferrovia boliviana, a Ferrocarril Andino S.A., a estrada de ferro do lado ocidental, tem conexão como Chile em bitola métrica nas localidades de Avaroa e Charanã, que permitem acessar os portos de Antofagasta e Arica, respectivamente. A empresa atende toda a região andina da Bolívia, entre as cidades de La Pa, Sucre, Potosi, entre outras, além de duas no Chile. (Santos, 2011).

Existem diversos projetos ferroviários de ligar a malha oriental com a ocidental, por Aiquile, Sucre e Tarija, condição que permitiria também os trens da Ferrocarriles Oriental S. A. chegar aos portos chilenos. Do lado brasileiro, a Novoeste é uma linha com traçado antigo e com sérios problemas de manutenção e conservação, e o volume de carga transportado, entre Corumbá e Rubião Jr. é pequeno. Nos seus 1942 quilômetros de extensão, a Ferroeste transportou, em 2006, 3,4 milhões de toneladas de minérios, grãos e combustíveis gerando um transporte de 1,4 bilhões de tku. Não existe transporte de passageiros (Santos, 2011).

Apesar de ser uma fronteira internacional, o fluxo do comércio exterior é muito pequeno, segundo os dados o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, foram transportados por ferrovia, em 2006, 210.690 t na exportação e 17.455 t na importação (ALAF, 2004)

O Brasil tem conexão ferroviária internacional com o Uruguai em dois pontos: Santana do Livramento (Rio Grande do Sul) - Rivera (Uruguai) e Jaguarão (Rio Grande do Sul) - Rio Branco (Uruguai). Nesses pontos, há a necessidade de transbordo, pois as bitolas são diversas: Brasil 1,000 m e o Uruguai 1,435 m. Em Quaraí (Rio Grande do Sul) - Artigas (Uruguai), apesar de existir as ferrovias, não há conexão A ferrovia uruguaia também tem conexão com a ferrovia argentina por meio da cidade de Salto Grande (Uruguai) e Concórdia (Argentina) na mesma bitola de 1,435 m. A extensão total da rede uruguaia já foi de 2.987 km (Santos, 2011).

Atualmente, o sistema ferroviário do Uruguai oferece o serviço de carga em pequena escala como, por exemplo, o transporte de cevada do Brasil para a Cervejaria Norteña, com transbordo via rodoviária.

Do lado brasileiro, a América Latina Logística (ALL) desativou os ramais de acesso à rede uruguaia, os quais já apresentavam baixo volume de cargas desde os tempos da RFFSA, permanecendo apenas o

de Santana do Livramento, que pode transbordar 70 t/h e tem a capacidade de armazenagem de 4.000 toneladas. Segundo o Ministério da Indústria, Comércio e Desenvolvimento, em 2006, foram importadas 87.994 t de mercadorias do Uruguai por via ferroviária e não houve exportação, números realmente pequenos dentro do Mercosul (Santos, 2011).

A conexão com a Argentina também está subutilizada, pois a ferrovia argentina opera apenas 7.000 km dos 40.000 km totais, num caso semelhante ao do Brasil, com sua utilização por concessões, com quatro medidas de bitolas diferentes: 1,676m, 1,435m, 1,000m e 0,750m.

O sistema ferroviário argentino foi privatizado em diversas etapas que tiveram início em novembro de 1991, pelas linhas de transporte de carga. Ainda de acordo com Silvio dos Santos, a ferrovia argentina tem conexão com a ferrovia uruguaia entre Salto Grande (Uruguai) e Concórdia (Argentina) na mesma bitola de 1,435 m, sobre o Rio Uruguai. (ALAF, 2004)

A malha de bitola larga, 1,676 m, atende a região central da Argentina cobrindo o Pampa Úmido até as encostas dos Andes, desde Bariloche, Neuquén, Malargüe, Mendoza, Córdoba até Tucumán. Todavia, não existe conexão com a malha sul do Chile que tem a mesma bitola, 1,676 m. (ALAF, 2004)

A malha de bitola métrica serve a região norte até as divisas com a Bolívia e com o Chile, além das linhas Buenos Aires à Carhué e Vila la Plaza, a sudoeste da capital. (ALAF, 2004)

Na fronteira com o Chile em Socompa (as duas cidades com o mesmo nome), é possível a conexão com os portos de Antofagasta e Iquique, em bitola métrica. Em Las Cuevas (Argentina) e Caracoles (Chile), a bitola métrica termina em Los Andes, já dentro do Chile, onde começa a bitola larga chilena de 1.676 m, não havendo, portanto, a conexão até Santiago e o Porto de Valparaíso na mesma bitola.

A rede ferroviária sul-americana é complementada pelo Chile, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela. A ferrovia chilena tem conexão com a Argentina e Bolívia, e uma extensão razoável de 9.335 quilômetros. As ferrovias dos demais países são de pequena extensão e não têm conexão com as nações limítrofes, com exceção da pequena ferrovia peruana de Tacna ao Porto de Arica no Chile, numa extensão de menos de 100 quilômetros (ALAF, 2004)

As demais ferrovias, nos diversos países, têm a função de ligar os portos com as regiões de produção, agrícola ou mineral, representando uma função localizada. A integração da América Latina por ferrovia é um sonho ainda distante. Além da difícil geografia, de um lado a Cordilheira dos Andes, do outro os caudalosos rios amazônicos, as pequenas extensões das linhas e as diferentes bitolas, não dão qualquer perspectiva, mesmo a longo prazo, de interligação dessas ferrovias (Santos, 2011).



Figura 2.10 - Malha ferroviária Argentina (ALAF, 2004)

Nas fronteiras as diferentes bitolas obrigam as companhias ferroviárias a fazerem custosos e demorados transbordos de mercadorias e passageiros. Na fronteira russo-polonesa, existe a troca de truques graças as instalações de elevação dos vagões e carros de passageiros. Esse sistema também é utilizado em Uruguiana no intercambio de vagões entre o Brasil e a Argentina.

2.7 Bitolas

Levando em consideração os fatores técnicos, a importação da maior parte do material rodante e dos componentes da via permanente (via ferroviária em si), que podem ser conflitantes com as normas empregadas atualmente no Brasil são os principais limitantes de um sistema mais eficiente. Como principal obstáculo à uma integração do sistema ferroviário brasileiro, a utilização de bitolas fora do padrão internacional (1,435 m) resulta numa série de adaptações e medidas que devem ser tomadas para a utilização de nossas vias ferroviárias. A bitola de uma ferrovia é a medida entre as faces internas dos boletos dos trilhos, ou seja, a distância entre as faces internas das duas filas de trilhos, medida a 16 mm, abaixo do plano de rodagem (plano constituído pela face superior dos trilhos). A bitola padrão, normal ou stander é a de 1,435 metro, apesar de que em numerosos países elas são diferentes do número destacado.

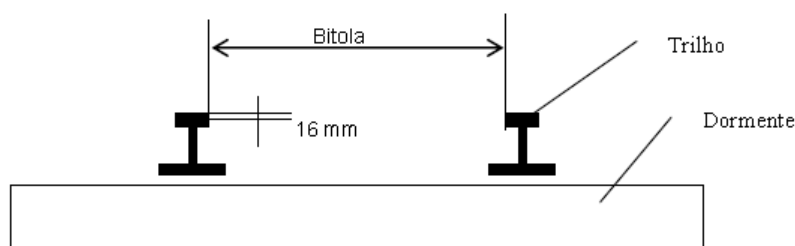


Figura 2.11- Bitola (BORGES NETO, 2010)

As bitolas, em si, não alteram relevantemente a capacidade de carga de uma ferrovia, devido à maior pressão exercida sobre os dormentes, mas sim devido ao gabarito da ferrovia de bitola mais larga, que permite a utilização de um vagão de maior volume e conseqüentemente, maior capacidade de carga. Somando-se ao fato da não utilização do padrão internacional, temos a utilização de não somente uma bitola principal, que facilitaria o problema, mas sim duas principais medidas de bitola. A chamada bitola métrica (termo não técnico, porém dentro do setor é muito utilizado para se referenciar à bitola de medida 1,000 m) utilizada em 78% das ferrovias brasileiras e a bitola larga (1,600 m), com participação de cerca de 19% (com previsão de crescimento, já que a maioria das atuais ferrovias são construídas nessa bitola). Além da utilização de outras bitolas em menor escala. Verificamos na figura 2-12 o mapa ferroviário brasileiro com a diferenciação das bitolas, com a bitola larga com o traçado grosso e a bitola métrica com o traçado mais fino. As linhas em construção estão tracejadas, e os corredores estão divididos pelas cores. As vantagens e desvantagens da Bitola de 1,000 metro são descritas a seguir:

- curvas de menor raio;
- menor largura de plataforma, terraplenos e obras de arte;
- economia de lastro, dormentes e trilhos;
- menor resistência a tração;
- economia nas obras de arte;
- material rodante mais barato.
- menor capacidade de tráfego;
- menor velocidade.

A adoção de bitolas com medidas inferiores traz outros benefícios. Como a redução é mais rápida e fácil, pois via mais estreita pode utilizar o projeto da via mais larga sem problemas, os veículos poderiam simplesmente ter os truques trocados e os bitola larga poderiam, em fase posterior, ser parcialmente adaptados, como a redução das bitolas das locomotivas, especialmente das fabricadas pela Baldwin (que

as fabricava prevendo a redução). O planejamento das operações de redução de bitola é mais simples que o planejamento para um alargamento.

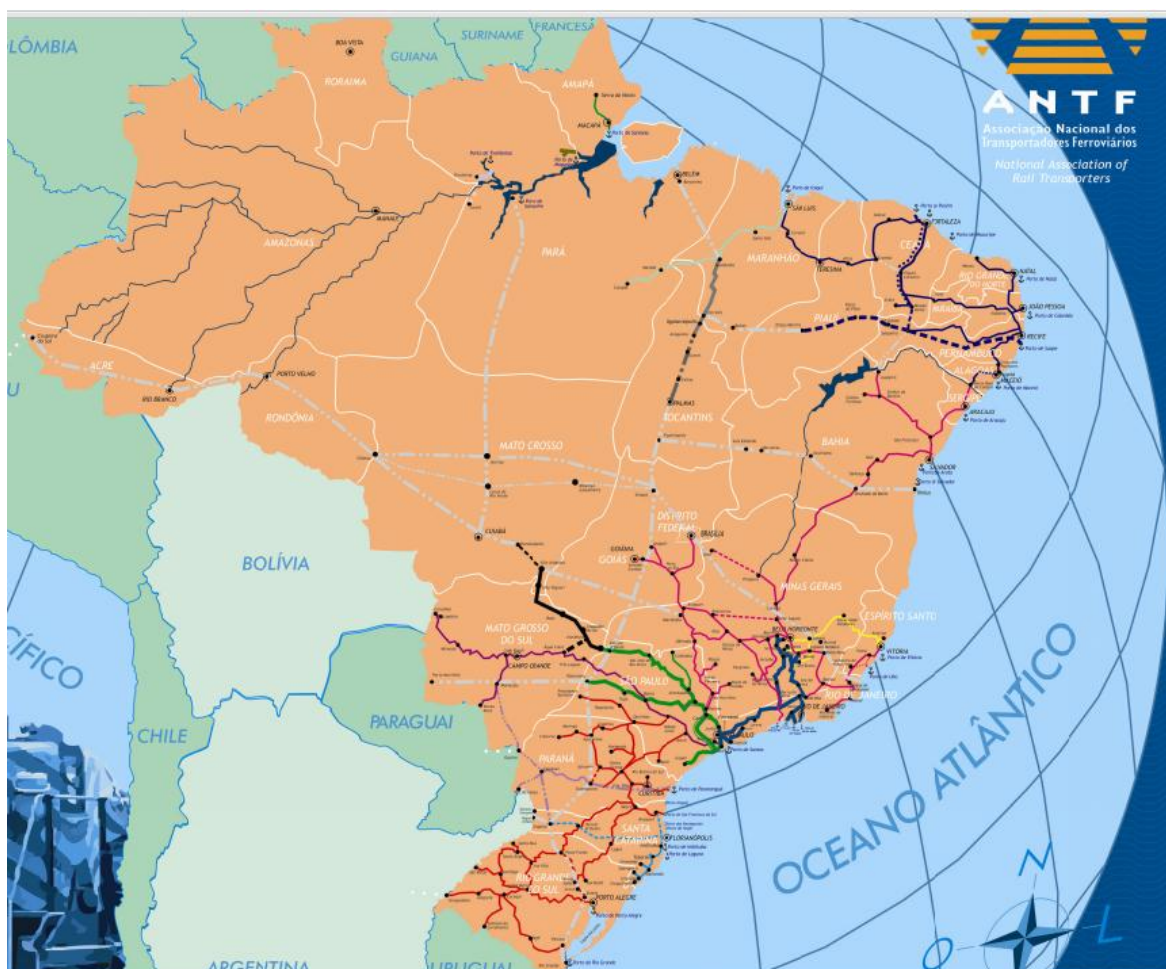


Figura 2.12 - Mapa ferroviário Brasileiro (ANTF, 2011)

Tabela 2-6- Características das Ferrovias do Brasil (FERRONORTE, 2006)

FERROVIAS DO BRASIL					
nome	sigla	km	bitola (m)	linha	estados
América Latina Logística	ALL	6.586	1,00	singela	SP,PR,SC,RS
Companhia Ferroviária do Nordeste	CFN	4534	1,00	singela	BA,SE,AL,PE,PB, RN,CE,PI,MA
Estrada de Ferro Carajás	EFC	1065	1,60	singela	PA,MA
Estrada de Ferro Vitória-Minas	EFVM	898	1,00	dupla	MG,ES
Estrada de Ferro Trombetas	EFT	35	1,00	singela	PA
Estrada de Ferro Jari	EFJ	68	1,60	singela	PA
Estrada de Ferro do Amapá	EFA	194	1,435	singela	AP
Ferrovia Centro-Atlântica	FCA	7080	1,00 e 1,60	singela	BA,MG,ES,RJ,GO,DF,SP
Ferrovia Bandeirantes	Ferrobán	4186	1,00 e 1,60	singela/dupla	SP,MG
Ferrovia Norte Brasil	Ferronorte	500	1,60	singela	MS,MT
Ferrovia Norte-Sul	Norte-Sul	257	1,60	singela	PA,MA
Ferrovia Novoeste	Novoeste	1621	1,00	singela	SP,MS
Ferrovia Paraná	Ferropar	250	1,00	singela	PR
Ferrovia Tereza Cristina.	FTC	164	1,00	singela	SC
MRS - Logística	MRS	1674	1,60	singela/dupla	MG,RJ,SP
	TOTAL	29.112			
BITOLAS – EXTENSÃO TOTAL(km)	bitola 1,00	23891	bitola mista	478	
	bitola 1,435	194	desativadas	2004	desde 1985
	bitola 1,60	5027	novas	1007	desde 1990

A capacidade de transporte (maiores tonelagens, por trem), mesmo na bitola larga, fica limitada pela capacidade dos vagões e principalmente, dos trilhos.

Existe uma carga máxima, definida em função do seu diâmetro da roda a qual o trilho suporta, para que a tensão no contato roda- trilho não ultrapasse a resistência do trilho.

Atendendo a este fator e para tirar o maior proveito possível de uma bitola larga (1,60 m), por exemplo, seria necessário otimizar as dimensões dos vagões, procurando aumentar, se possível, a relação lotação/peso total. Vejamos, então, a comparação entre dois vagões para minério, de bitolas 1,60 m e 1,0 m:

Tabela 2-7 Comparação lotação dos vagões (BORGES NETO, 2010)

Bitola:	1,600 m	1,000 m
Lotação	95 t	74
Tara	24 t	16
Total	119	90
relação de carga	100%	82%

Para o trem que deseja trafegar de um de um determinado destino a outro que, entre o percurso, seja necessária a passagem para uma ferrovia de bitola diferente, temos algumas soluções que são utilizadas, apesar de que em muitas das vezes essa opção de tráfego em ambas é simplesmente descartada, fazendo

com que o trem trafegue por uma distância muito maior ou simplesmente não tenha o destino final incluso na sua malha ferroviária. Porém quanto é necessária, existem as seguintes soluções.

2.8 Soluções Adotadas na Transferência

Para realizar essa conexão entre terminais de carga onde o veículo ferroviário não pode concluir seu destino, temos algumas opções, como foi dito anteriormente, como o transbordo da carga de um trem para outro ou para um caminhão e o intercâmbio de material rodante entre ferrovias de bitolas diferentes. Esse último é feito das mais diversas maneiras ao redor do mundo. O mais usual e mais precário, é a troca do conteúdo dos vagões de um trem para outro, em terminais de transbordos limítrofes às regiões de comércio. Essa solução se apresenta como a mais inviável para o sistema ferroviário, pois normalmente o transbordo permite uma intermodalidade no frete, fazendo com que, na maioria das vezes, a solução adotada é transpor o conteúdo do vagão ferroviário direto para um modal diferenciado, como o rodoviário, permitindo o envio direto ao destinatário na busca do tempo devido, além de aumentar em cerca de 15% as perdas de carga (no caso de cargas a Granel).

As soluções adotadas para transbordo e as que implicam em alterações no material rodante ou na via ferroviária podem separadas em três grupos, e serão explicadas e analisadas no capítulo a seguir.

2.9 Conclusões Preliminares

Concluimos, ao fim deste capítulo, a análise do cenário do modal ferroviário no Brasil, identificando como principais problemas da falta de integração:

- Estradas de ferro mal distribuídas pelo País (de forma dispersa e isolada), muitas em estado precário;
- Baixa densidade de estradas pelo tamanho do território;
- Descuido histórico;
- Priorização pelas rodovias;
- Falta de Políticas Públicas que incentivem investimentos;
- Ausência de uma regulamentação diferenciada;
- Falta de interesses por parte das concessionárias devido ao monopólio regional exercido;
- Baixo investimento tecnológico, importação de tecnologias ultrapassadas;
- Diferença de bitolas utilizadas que dificultam a integração entre ferrovias;
- Problemas relacionados ao transbordo ou transferência de carga;
- Como todos os demais itens são de foco administrativos, políticos e econômicos, a solução destes dois últimos itens nos interessa para a aplicação do eixo de bitola variável.

3. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Este capítulo apresenta um comparativo entre as soluções de transferência de carga aplicáveis no problema das vias de bitolas diferentes. É realizada um análise de tempo e custos de operação, para identificar as soluções viáveis..

A metodologia para a análise das soluções de transferência consiste num comparativo das soluções utilizadas atualmente no transporte ferroviário de cargas e passageiros na alternância de vias ferroviárias, tratada neste capítulo. O objetivo desta primeira parte é comprovar que o uso de um trem de bitolas variáveis pode ser uma solução utilizada no Brasil com uma boa relação custo-benefício. Assim, buscaremos primeiramente uma comparação geral entre as principais bitolas (bitola de 1,000 m e 1,600 m), a visão econômica da construção das ferrovias nas diferentes bitolas e custos da implementação de cada solução. Assim concluída esta parte, a partir-se-á para o estudo das alterações necessárias ao material rodante para a adaptação desse implemento, incluindo um estudo dinâmico do trem considerando cada tipo de bitola, no capítulo 4, para assim definir as capacidades e características de projeto por comparação dos fatores restritivos, permitindo circulação de um trem, tanto de carga quanto de passageiros, em ambas as vias ferroviárias com segurança. No capítulo 5 é feito um estudo das alterações de projeto do eixo de bitola variável necessárias para a implantação considerando as cargas resultantes do tráfego nas vias brasileiras.

3.1 Técnicas de Transferência

O intercâmbio de material rodante entre ferrovias de bitolas diferentes ou da carga dos mesmos é feito das mais diversas maneiras ao redor do mundo. O mais usual e mais precário, é a troca do conteúdo dos vagões de um trem para outro, em terminais de transbordos limítrofes às regiões de comércio. Essa solução se apresenta como a mais inviável para o sistema ferroviário, pois normalmente o transbordo permite uma intermodalidade no frete, fazendo com que, na maioria das vezes, a solução adotada é transpor o conteúdo do vagão ferroviário direto para um modal diferenciado, como o rodoviário, permitindo o envio direto ao destinatário na busca do tempo devido.

As soluções que implicam em alterações no material rodante ou na via ferroviária podem ser separadas em três grupos: os que incluem o transbordo da carga, podendo ser manual ou mecanizado; os que alteram a característica do material rodante, como a substituição dos truques ou utilização do eixo de bitola variável; e os que alteram as características da via permanente, como a implantação de um terceiro trilho. Cada um é explicado a seguir.

3.1.1 Transbordo manual e mecanizado da carga

Técnicas de transbordo variam do básico de trabalho manual intensivo para métodos mecânicos métodos envolvendo equipamentos com diferentes níveis de automação e tecnologias. O tipo e volume da carga, a transbordar, assim como a extensão do trem têm um papel na determinação do tipo de transbordo empregado.

O uso de containers permite uma manipulação mais segura e mais rápida de carga. Transbordo de contêineres requer uma grande infraestrutura de transbordo com um conjunto de faixas paralelas de bitolas diferentes.

Dependendo do tipo de equipamento a ser utilizado, as faixas podem ser separadas por uma área de pavimento pesados para permitir o funcionamento dos veículos, como guias, guindastes de pórtico com pneus de borracha ou ferroviário, entre outros. A aquisição destes materiais encarece bastante o investimento para um pólo de transbordo de carga, que normalmente é realizado com parcerias entre empresas interessadas.

3.1.2 Troca de Truque de Vagões e Locomotivas

Os truques dos vagões consistem na estrutura que fixa as rodas e a suspensão ao chassi do vagão. São pequenos veículos giratórios, de pequena base rígida que se assentam, elasticamente, sobre os rodeiros e recebem o apoio da caixa, por meio de pivôs ou piões. Cada pião é montado sobre uma travessa, no sentido transversal do veículo (travessão), suspenso, elasticamente, nos extremos. A diferença entre os truques, para vagões e carros, reside na flexibilidade dos sistemas de molas. Essas estruturas, normalmente feitas de aço carbono, estas estruturas pesam toneladas e geram um trabalho muito pesado, e necessitam de uma instalação hidráulica que eleve os vagões e permitam o acesso aos truques (Borges Neto, 2010).

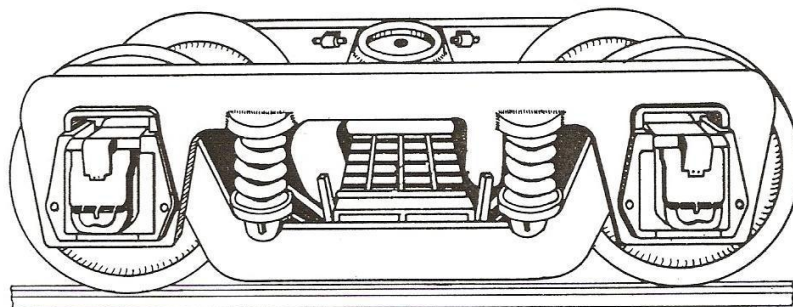


Figura 3.1- Truque de Vagão (Borges Neto, 2010)



Figura 3.2 - Truque de locomotiva (EIF, 2011)

Na fronteira russo-polonesa, existe a troca de truques graças a essas instalações de elevação dos vagões e carros de passageiros. Esse sistema também é utilizado em Uruguiana no intercâmbio de vagões entre o Brasil e a Argentina, cujas fotos abaixo mostram esse tipo de operação.



Figura 3.3 - Troca de truques manual (Santos, 2011)

Esse sistema de troca de truque representa um atraso de meia hora por vagão componente do trem. Logo, podemos inferir que, com um trem de 36 vagões, temos um atraso de quase 1 dia, aumentando as despesas das transportadoras e conseqüentemente o valor agregado do material transportado.

Outro tipo de se encaixa como modificação no truque de vagões são as alterações feitas por empresas brasileiras quando são importadas locomotivas de bitolas diferentes do trecho utilizado. Essa alteração no truque normalmente gera outros problemas, pois a utilização em bitolas diferentes seguem normas diferentes, como o peso em toneladas por eixo, exigindo modificações também em outros componentes da locomotiva, inclusive no conjunto de motores elétricos, que normalmente são distribuídos por eixo. O raio de curva e a altura dos engates também são modificados quando a bitola é alterada, exigindo possíveis modificações no dispositivo de engate dos vagões.



Figura 3.4-Alteração bitola de truque (EIF, 2011)

3.1.3 Implantação do Terceiro Trilho

O terceiro grupo das soluções de transferência de material inclui alterações na via permanente (ferrovia em si), sendo a instalação do terceiro trilho, prática muito utilizada no Brasil, principalmente na região sudeste onde existem o encontro das bitolas de 1,600 m e 1,000 m em uma mesma malha ferroviária. Entre os dois trilhos da bitola larga é colocado o trilho da bitola estreita, com foi feito entre Campinas e a Baixada Santista nas linhas da ex-Fepasa. Campinas é o entroncamento das linhas de bitola larga das antigas Paulista e Araraquarense e também da linha de bitola métrica da ex-Mogiana. Os trens de ambas as bitolas podem trafegar no trecho de bitola mista, assim a como as linhas da antiga Sorocabana, esta de bitola métrica, que também se conecta a esse trecho na altura de Mairinque.



Figura 3.5-Implantação do terceiro trilho (Santos, 2011)



Figura 3.6-Via permanente de duas bitolas (Santos, 2011)

3.1.4 Eixos de Bitolas Variáveis

Idealizado na Espanha, que conta com uma malha ferroviária de bitola diferente do padrão europeu, esse sistema consiste no projeto de um rodante (conjunto eixo mais rodas) que pode variar o comprimento de sua bitola, com a assistência de um trilho guia presente na seção de transição entre as duas ferrovias de bitolas diferentes. Normalmente, ele possui uma roda que pode ser deslizada pelo eixo (com a utilização de um eixo para ambas as rodas ou um eixo para cada roda) ou utiliza um eixo móvel no interior de um vazado, podendo assim alterar a distância das bitolas pela ação dos próprios trilhos e de um contra-trilhos, que conduzem-nas para sua nova posição. Portanto, as rodas podem ser fixadas sobre o eixo em duas posições diferentes correspondendo as duas bitolas das linhas adjacentes, graças a um dispositivo especial de trava que é acionado no momento de troca de via. Esse mecanismo espanhol, altera a bitola de 1,676m para 1,435m, ou seja, uma diferença inferior a 250 milímetros entre as distâncias das bitolas.

Na fronteira franco-espanhola, perto de Port Bou, são utilizados carros de passageiros com eixos de bitolas variáveis, cujo trem é denominado de Talgo. Pela ação dos próprios trilhos e de um contra-trilho as rodas são conduzidas para a nova posição e aí travadas novamente. A operação é efetuada a uma velocidade de 3 km/h, ou seja, um trem com 25 vagões faz a operação em 10 minutos, um tempo equivalente para os tramites legais de fronteira. Muito mais rápida que a troca manual dos truques. O sistema utiliza um trilho guia, que reposiciona a roda na medida da bitola desejada. É utilizado para isso um conjunto de trilhos acionados por atuadores hidráulicos. Os trilhos são conectados ao fim da via de bitola corrente e ao início da via de bitola a ser percorrida. Esse trilho especial é desenvolvido por algumas empresas européias e é utilizado como sabe para outros dispositivos de eixos variáveis. A carga do trem normalmente é transferida para rodilhos por um trilho externo, normalmente na largura do truque. Assim, o peso das rodas é transferido e elas ficam

desacopladas e livres para mudar de posição, para em seguida serem novamente acopladas. As instalações e as fases para a alteração da bitola é mostrado nas figuras a seguir:



Figura 3.7 Trilho hidráulico de transferência (CAF, 2011)

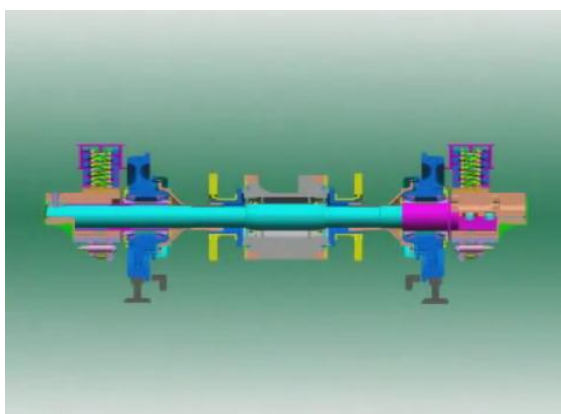


Figura 3.8

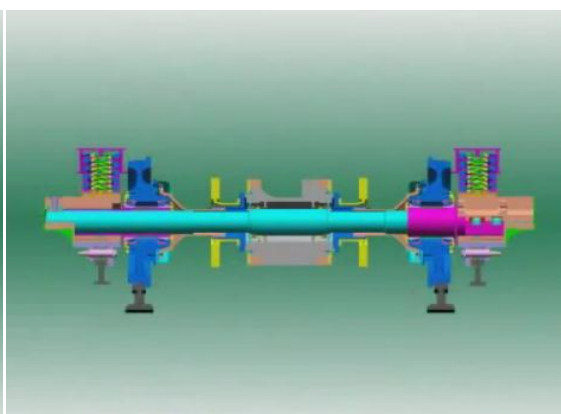


Figura 3.9

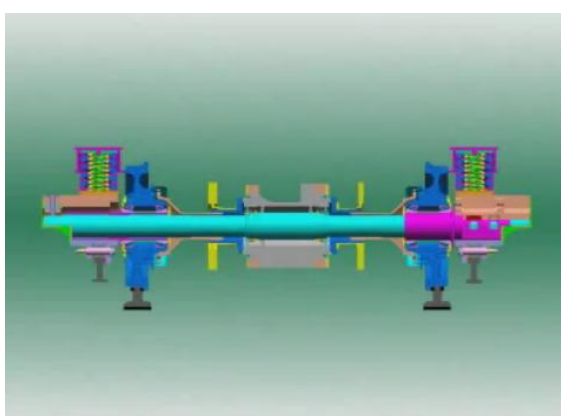


Figura 3.10

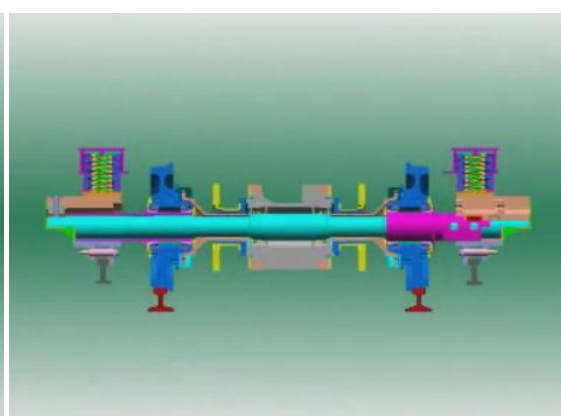


Figura 3.11

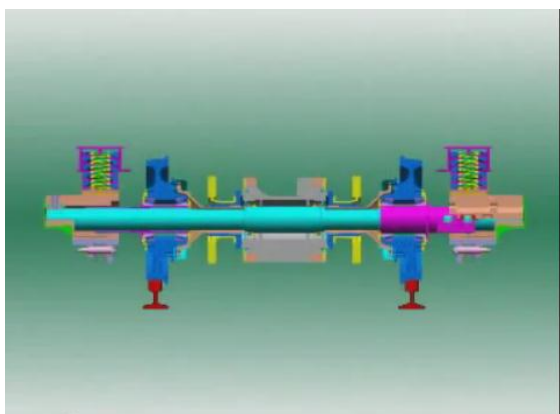


Figura 3.12

Figuras 3.8 a 3.1 (CAF, 2011): entrada do trem no trilho de transferência; Aplicação dos pesos sobre os rodilhos; destravamento do acoplamento; mudança de distância da bitola; travamento do acoplamento e aplicação da carga nas rodas.



Figura 3.13 - Trem passando por trilho de transferência (Santos, 2011)

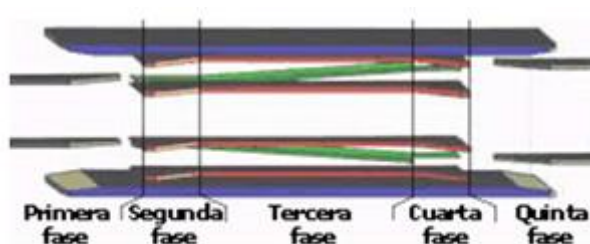


Figura 3.14 - Fases da transferência (Santos, 2011)

Para a instalação no mercado brasileiro, algumas ponderações devem ser realizadas. Primeiramente, a distância entre as bitolas é considerável para o nosso caso, sendo de 600 milímetros. Assim, deve ser realizado um novo estudo sobre o dimensionamento do eixo e a fadiga relacionada à ambas as bitolas. O transporte ferroviário brasileiro de cargas pesadas é restrito ao transporte de minério de ferro, ou seja, o transporte a granel e de containers não alcançam metade da carga sobre os eixos, e esse mineral é majoritariamente direcionado à exportação, portanto não é nosso objetivo básico trabalhar com vagões de carga tão alta. Um mercado nacional e sul-americano demanda uma movimentação de containers e

outros produtos que requerem menos esforços do material rodante e que realmente representam uma oportunidade para essa flexibilidade de tráfego. Sendo assim, consideraremos para implantação desse projeto (não sendo restrito às outras capacidades de transporte) a utilização de eixos de peso bruto máximo (soma da tara do vagão mais a carga útil) de 64 toneladas, que representa a maioria destes tipos de transporte.

Quando o projeto do eixo de bitola variável é posterior ao desenvolvimento do trem, ou seja, este será uma adaptação ao material rodante, ele normalmente é realizado pela troca integral do truque (bogie) dos carros e da locomotiva gerando um considerável dispêndio, que representa um alto investimento inicial. Porém, a solução apresentada para o mercado brasileiro, buscando baratear essa instalação vem graças a, paradoxalmente, a idade do material rodante em operação na maioria das malhas ferroviárias brasileiras. Elas têm em comum a utilização de um truque específico, do tipo integral, baseado no modelo de Bettendorf (figura 3-15), o que facilita um projeto de instalação em série. Esse truque é fabricado em aço fundido, e tem três peças principais. Duas armações laterais, que, em vez de serem de barras chatas, como nos primeiros truques ferroviários, constituem uma só peça de aço fundido, com espaços para encaixar as caixas de graxa e os extremos do travessão central, e a travessa central do truque, também de aço. A diferenciação do truque de vagão de carga para carro de passageiro reside basicamente na suspensão. Enquanto no de carga a suspensão é composta por um conjunto de molas helicoidais (normalmente 10) e o amortecimento é do tipo de cunha, no truque de carros de passageiros é necessário um sistema mais complexo e que reduza com mais eficiência os movimentos oscilatórios, devido à maior velocidade do trem de passageiros.

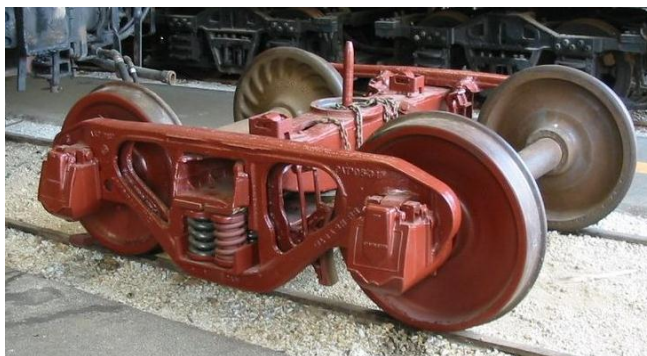


Figura 3.15 - Truque de Bettendorf (wikipedia, 2011)

3.2 Comparações entre as soluções

Nesta seção, abordaremos as vantagens e desvantagens de cada solução que pode ser adotada, com uma simulação do ponto de vista econômico (considerando o investimento e manutenção) e o tempo de cada operação.

3.2.1 Quadro de vantagens

As vantagens e desvantagens de cada solução que pode ser adotada estão descritas na tabela a seguir:

Tabela 3-1- Comparação das soluções

Solução	Vantagens	Desvantagens
Transbordo Manual	Menor investimento inicial Sem necessidade de mão de obra especializada.	Tempo de operação extremamente alto, incompatível com a ideologia da logística; Requer alterações nas locomotivas e vagões. Requer galpões específicos e de grandes dimensões Manipulação física aumenta o risco de danos e furtos Fator de trabalho intenso Acréscimo de preço final do frete
Transbordo Mecanizado	Investimento inicial relativamente baixo; Tempo de operação aceitável; Manipulação indireta da carga; Fator de trabalho de menor intensidade;	Acréscimo de preço final do frete Requer alterações e implementações específicas Alta dependência das instalações.
Troca de Truque	Manipulação indireta da carga.	Alto investimento inicial; Alto tempo de operação (atraso); No caso de carga desbalanceada, requer o reposicionamento da carga, resultando num aumento de tempo de operação; Manutenção especializada
Eixo de bitola Variável	Menor tempo de atraso de frete; Evita custos de transbordo e de operação;	Investimento inicial dependente do número de vagões. Manutenção especializada
Terceiro trilho	Não é necessária alteração no material rodante;	Aplicável somente nas vias de bitola larga Diminui a resistência da via base Custo elevado

3.2.2 Comparação econômica entre as soluções

A seguir as capacidades padrões e infraestrutura necessária que representam o capital a ser investido devido ao desenvolvimento e implantação de cada uma das técnicas relacionadas acima. Será considerado o tráfico de containers para referência (exceto a implantação do terceiro trilho, onde somente abordaremos o investimento por quilômetro que ferrovia). Os valores utilizados são médias corrigidas (com inflação acumulada do período de 15 anos de 250%) com base em relatórios e depoimentos de empresas logísticas (ALL Logística, 2011), prestação de conta governamental (para implantação da linha ferroviária (STN, 2011), O livro de Custos de transporte (CASTRO, 1999) e do artigo The Railway Break-of-gauge Problem and Possible Solutions in the ESCAP Region (ESCAP, 1996) para o cálculo da troca de truques e bitola variável. Mão de obra e manutenção não considerados.

Transbordo de carga:

- Capacidade de transbordo de 48.000 TEU per ano;
- 2 instalações de vias permanentes paralelas, uma em cada bitola, que acomoda 40 vagões containers (acomodando no total de 80 containers);
- Infraestrutura com capacidade para acomodação de 224 TEU acomodados num limite de empilhamento de 3 containers;
- Área pavimentada entre as vias permanentes de pelo menos 13 metros;
- Pavimento de alta capacidade de carga de área de 4.000 m²
- Total de investimento aproximado: US\$ 10.000.000,00

Troca de truques:

- Instalações de via permanente única (bitola mista);
- Capacidade de troca de 56 vagões por levantamento;
- Linhas de transferência e armazenamento dos truques;
- Aproximação dos truques por ambos os lados;
- Dispositivos automáticos de fixação e translação dos truques;
- Total do investimento aproximado: US\$ 15.000.000,00

Terceiro trilho

- Adaptação da via permanente (10%)
- Aquisição e instalação do terceiro trilho (75%)
- Acréscimos aparelhos de manutenção (15%)

- Total do investimento aproximado: US\$ 1.400.000,00 (por quilômetro)

Bitola variável:

- Infraestrutura para instalações de trilho especializado de aproximadamente 300 m²;
- Aquisição do trilho hidráulico;
- Troca de truques (dois por vagão, 56 vagões, US\$ 100.000 por vagão);
- Construção de via permanente para ligação entre vias férreas de 3 km (US\$ 1.500.000 por km)
- Total do investimento: US\$ 10.000.000,00

Obs: A implantação do trem de bitola variável e do terceiro trilho é única, uma vez que implementado o sistema material rodante e a via permanente não necessitam de mais modificações. Diferente das outras soluções, onde para o cada passagem acrescentam-se custos de manuseio e serviços maiores que estas duas soluções.

3.2.3 Tempos e custos de operação

Com base na apresentação de Mirosław (Kancierz, 2007) e em informações fornecidas pela ALL (ALL Logística, 2011), temos a geração de um gráfico de tempo poupado e custos reduzidos devido a cada tipo de transferência de carga.

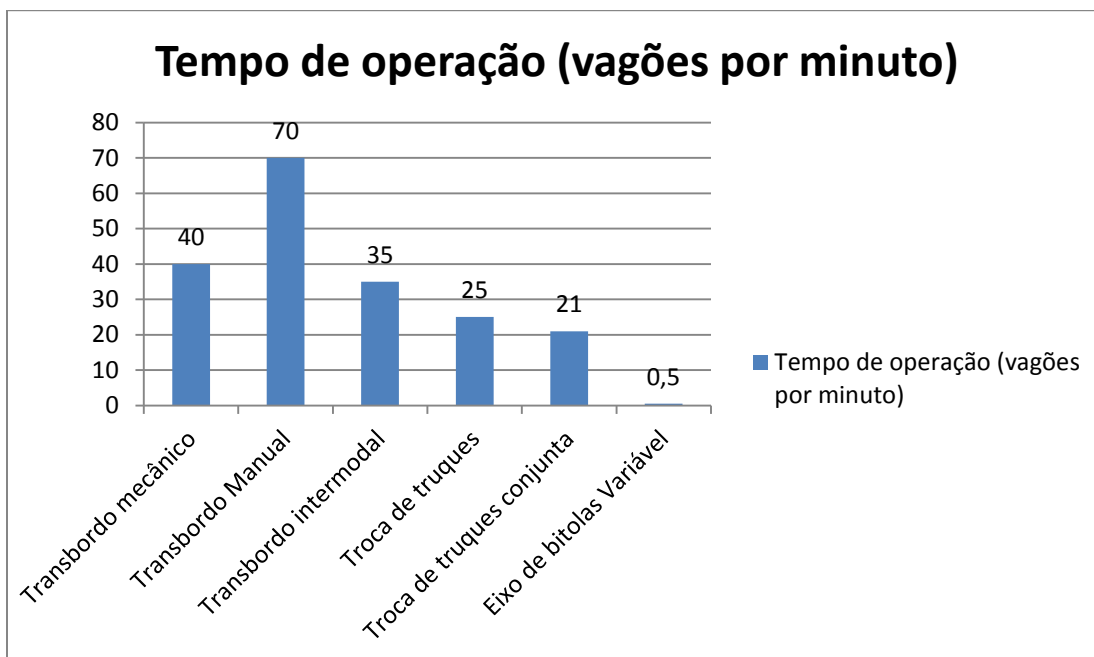


Figura 3.16- Gráfico de tempo de operação

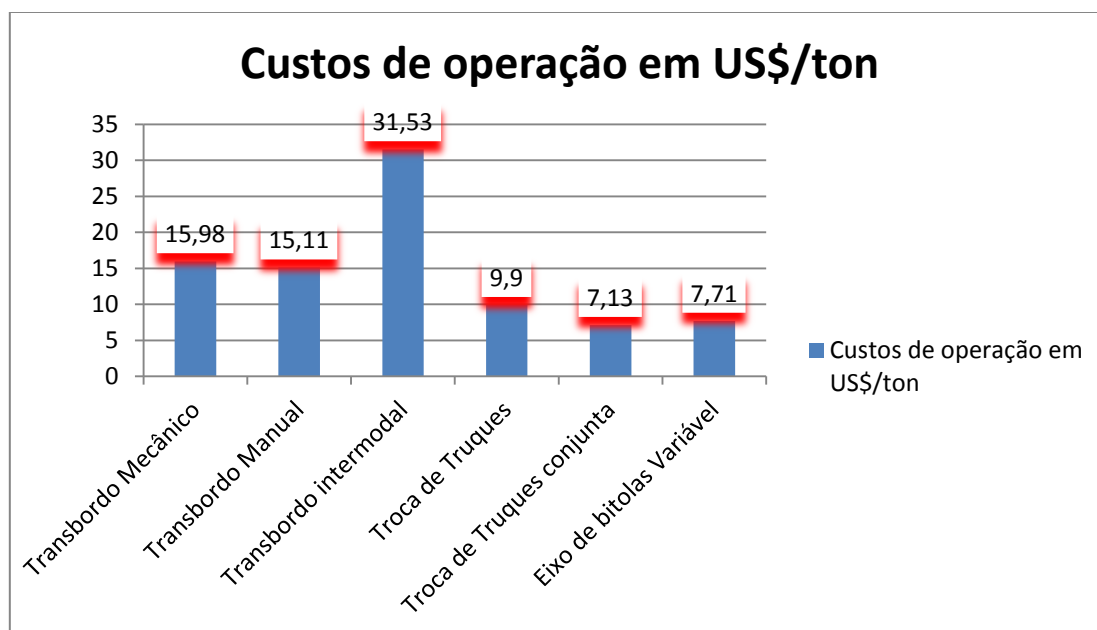


Figura 3.17 - Gráfico de custo de operação

3.2.3 Análise da viabilidade das soluções

Como solução para o problema de interligação no Brasil, visando o crescimento do setor ferroviário, criação de tecnologias próprias e um custo-benefício, adotamos com base nas informações desde capítulo o desenvolvimento do eixo de bitola variável como aplicação viável. Considerando o investimento e custos de operação, comparando principalmente com a redução do tempo de operação, essa solução se mostra viável em relação às outras. Para o mercado brasileiro, como foi dito anteriormente, esse sistema pode ser aplicada diretamente nos truques usualmente utilizados mediante a implantação de alguns dispositivos e a substituição dos rodeiros. Assim, para a implantação do projeto, terão de ser tomadas novas considerações sobre o dimensionamento dos eixos e rodas mediante ao novo esquema de esforços e fadiga, como também as alterações advindas desse novo conjunto (mancais, sistema de freios) e dos fatores de utilização de cada tipo de bitola de via permanente, como as normas técnicas e estudos de estabilidade estática e dinâmica do trem. Assim, ao decorrer deste projeto, avaliaremos os fatores de projeto, principalmente os fatores restritivos e considerações a serem tomadas para que um trem trafegue em ambas as vias ferroviárias, e estas informações serem utilizadas como subsídio a um projeto final do implemento mecânico.

4. DINÂMICA E ESTABILIDADE DO TREM

Este capítulo apresenta a metodologia de cálculo necessária para estabilidade dinâmica do trem levando em consideração a utilização de vias de diferentes bitolas, e analisa as dimensões restritivas dos trens de acordo com os gabaritos de vias e normas relacionadas.

A dinâmica de um veículo ferroviário inclui várias considerações de forças e esforços. Como pretendemos a utilização de um veículo em ambas as linhas ferroviárias de bitolas diferentes, devemos ater nossa atenção ao fato de forças diferentes em cada caso. Dentre as forças a serem consideradas para os cálculos da dinâmica veicular do material rodante, podem ser excluídos previamente esforços longitudinais e verticais (tração, frenagem, carregamentos) e oscilações dos eixos (devido à imperfeições dos trilhos e conicidade das rodas), podendo assim ser considerado, para as diferentes bitolas adotadas, somente esforços laterais em curvas. “A existência da curva, no traçado ferroviário, acarreta problemas para a circulação dos trens, que devem ser estudados, para que a via seja estabelecida de modo a proporcionar as melhores condições possíveis de segurança e conforto na circulação” (Halvécio Lapertosa, 1979).

Com a exclusão destas classes de esforços, pois os momentos fletores longitudinais, tensões de contato na via, entre outras forças que não são diferenciadas em cada caso das bitolas, a diferença resultante nessa alteração é basicamente a aceleração lateral resultante de uma curva, que em excesso poderia acarretar em descarrilamentos, além das componentes das forças em atuação nas rodas dos veículos. Em uma via ferroviária estabelecida em um plano horizontal, a força centrífuga agirá forçando o veículo no sentido do trilho externo à curva. Incluem forças laterais as forças devido ao vento.

No projeto de ferrovias, costuma-se adotar uma medida para minimizar os efeitos da aceleração lateral imposta ao material rodante. Assim, é a utilização da superelevação. Desse modo, inclina-se a via ferroviária pelos dormentes num ângulo α , elevando o trilho externo e criando um componente para balancear a força centrífuga. A maior altura do trilho externo em relação ao interno é o que se denomina de *superelevação do trilho* ou *superelevação da via*, definido pela letra h . O cálculo da superelevação presente nas ferrovias é diretamente relacionada à medida da bitola da ferrovia. Assim, a partir da resolução para determinar a elevação, pode-se inverter a equação em função da velocidade do trem para determinar as restrições de velocidade deles em cada tipo de via. A metodologia de cálculo dessa seção foi retirada dos livros Estradas de Ferro Vol I e II (Brina, 1979), e do livro (CASTELO BRANCO, 2006)

4.1 Cálculo da superelevação

Sabe-se da mecânica, que um corpo ao percorrer uma curva está sujeito à força centrífuga F_c :

$$F_c = m\gamma = \frac{mv^2}{\rho} \quad (4.1)$$

sendo m a massa do veículo, v a velocidade e ρ o raio de curvatura. Adota-se então um veículo percorrendo uma trajetória circular de raio R , então:

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (4.2)$$

e para as constantes restantes, adota-se P para o peso do veículo, b para a bitola (em metros), c a largura do boleto do trilho e B a distância centro a centro dos trilhos. Portanto, tem-se:

$$B = b + c \quad (4.3)$$

Para as velocidades, define-se v a velocidade em m/s, V para velocidade em km/h e R para a resultante de F_c e de P .

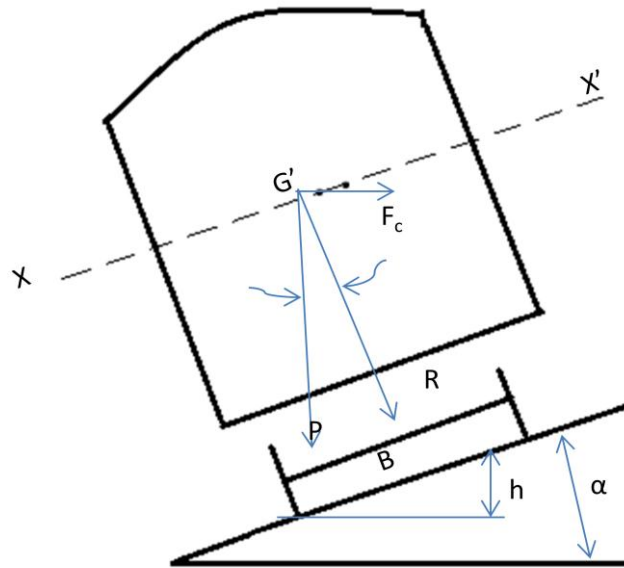


Figura 4.1 - Diagrama 1 do Veículo

Projetando as forças que atuam no centro de massa do veículo (G'), sobre o eixo XX' e admitindo a resultante R normal ao plano dos trilhos:

$$P \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = F_c \cos \alpha \quad (4.4)$$

ou

$$P \operatorname{sen} \alpha = F_c \cos \alpha \quad (4.5)$$

(para uma inclinação pequena, pode-se aproximar, sem erro sensível, $\cos \alpha = 1$). Assim:

$$P \sin \alpha = F_c \quad (4.6)$$

Da figura 4-1, retira-se:

$$\text{Sen } \alpha = \frac{h}{B} \quad (4.7)$$

$$P \frac{h}{B} = F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (4.8)$$

E conclue-se:

$$h = \frac{Bv^2}{gR} \quad (4.9)$$

Substituindo g e v nessa expressão por:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ e } v = \frac{1000 V}{3600} \quad (4.10)$$

Obtem-se:

$$h = \frac{Bv^2}{127R} \quad (4.11)$$

com h , B e R em metros e V em km/h.

Assim, atribui-se o valor de h à superelevação para que se tenha totalmente equilibrada a força centrífuga e a resultante R passando pelo centro da via. Entretanto, esse cálculo prévio não considera a diferença dos trens que passam pela via, podendo ser trens de passageiros ou de carga, trens rápidos e trens lentos.

$$V_{\text{carga}} \neq V_{\text{passageiros}} \quad (4.12)$$

Para adicionar um fator de segurança maior para o estudo da velocidade limite do trem nas curvas, utiliza-se um critério adaptado para aumentar o fator de segurança. Esse critério consiste em dar um valor menor à superelevação, chamando-a de superelevação prática. Assim, dá-se um valor de h menor que o teórico achado nos critérios empíricos, isto é:

$$h_p < h_t (h_p = \text{superelevação prática}) \quad (4.13)$$

A força centrífuga não é equilibrada, mas a estabilidade é garantida por um coeficiente de segurança. H representa a altura do centro de gravidade em relação aos trilhos, que varia de acordo com os diversos tipos de veículos. Para locomotivas diesel-elétricas, o valor usual é de 1,50 a 1,80 m e para um trem de carga carregado, o valor varia de acordo com a bitola. Nos vagões de carga, essa altura tem um limite para cada tipo de bitola. No diagrama 4-2, o ponto G representa o centro de massa como trem paralelo ao

chão e G' representa o deslocamento do centro de massa devido à contração maior das molas da suspensão do lado externo do veículo que do lado interno.

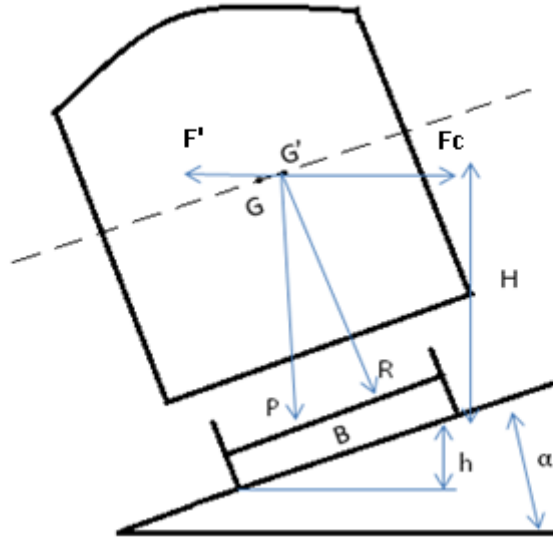


Figura 4.2 - Diagrama para cálculo de superelevação

Temos:

$$F_c = \frac{PV^2}{127R} \quad (4.14)$$

$$F' = P \sen \alpha \cdot \cos \alpha \approx P \sen \alpha = P \frac{hp}{B} \quad (4.15)$$

Então:

$$F - F' = \Delta F = \frac{PV^2}{127R} - P \frac{hp}{B} \quad (4.16)$$

Com os momentos em relação ao trilho externo definidos, tem-se o momento de reviramento e o momento estabilizador como:

$$M_r = \Delta F \cdot H = \left(\frac{PV^2}{127R} - P \frac{hp}{B} \right) \cdot H \quad (4.17)$$

$$M_e = P \cos \alpha = \left(\frac{B}{2} - d \right) = P \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.18)$$

Aplicando o fator de segurança (usualmente usa-se $n=5$):

$$M_e = n \cdot M_r \quad (4.19)$$

$$P \left(\frac{B}{2} - d \right) = n \left(\frac{PV^2}{127R} - P \frac{hp}{B} \right) \cdot H \quad (4.20)$$

De onde, pode-se concluir:

$$\frac{B}{2} - d = nH \left(\frac{V^2}{127R} - \frac{h_p}{B} \right) \quad (4.21)$$

$$\frac{1}{nH} \left(\frac{B}{2} - d \right) = \frac{V^2}{127R} - \frac{h_p}{B} \quad (4.22)$$

$$\frac{h_p}{B} = \frac{V^2}{127R} - \frac{1}{nH} \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.23)$$

$$h_p = \frac{BV^2}{127R} - \frac{B}{nH} \left(\frac{B}{2} - d \right) \text{ como o valor da superelevação prática.} \quad (4.24)$$

4.1.2 Cálculo da superelevação – Trens de passageiros

Para um trem de passageiros, acrescentamos o critério de conforto, e a superelevação é definida para que a aceleração não cause desconforto aos passageiros. Segundo diversas experiências, a aceleração máxima que um passageiro suporta sem lhe causar desconforto é de:

$$\gamma_{\text{máx}} = 0,6 \text{ ms}^{-2} \quad (4.25)$$

Então, sendo a expressão da superelevação:

$$h = \frac{BV^2}{127R} \quad (4.26)$$

Sendo que

$$\frac{V^2}{R} = \gamma; \text{ Conclui-se} \quad (4.27)$$

$$h = \frac{B\gamma}{g} \quad (4.28)$$

Portanto, para uma aceleração centrífuga não equilibrada, γ' corresponderá a uma parcela de superelevação igual a:

$$\Delta h = \frac{B\gamma'}{g} \quad (4.29)$$

$$h_p = h_t - \frac{B\gamma'}{g} \quad (4.30)$$

$$h_p = \frac{Bv^2}{127R} - \frac{By'}{g}; \quad (4.31)$$

Para uma maior garantia de conforto no caso de trens de passageiros, admite-se $\gamma = 0,50$, assim podendo ser aplicado para cada caso necessário.

$$h_p = h_t - \frac{0,5B}{g} \quad (4.32)$$

$$B = b + c \quad (4.33)$$

$$B_1 = 1,000 + 0,065 \quad (4.34)$$

$$B_2 = 1,435 + 0,070 \quad (4.35)$$

$$B_3 = 1,600 + 1,070 \quad (4.36)$$

$$h_{p1} = h_t - \frac{1,065 \times 0,5}{9,81} = \frac{Bv^2}{127R} - 0,054 \text{ (Bitola de 1,000)} \quad (4.37)$$

$$h_{p3} = h_t - \frac{1,670 \times 0,5}{9,81} = \frac{Bv^2}{127R} - 0,085 \text{ (Bitola de 1,600)} \quad (4.38)$$

Eventualmente, nas linhas ferroviárias, o trem de passageiros detém os limites de velocidade da via, sendo ele utilizado como base do cálculo de superelevação, seguindo o critério de superelevação mínima para evitar o tombamento dos trens de carga. No caso dos trens brasileiros, os quais a maioria rodam em ferrovias não compartilhadas com trens de passageiros, são utilizados critérios de segurança para cálculo da superelevação. Devido ao fato do trem de bitola variável trafegar em ambas as vias, sendo elas com uma superelevação já determinada, deve-se então inverter o cálculo da velocidade máxima em função da superelevação aplicada nas vias permanentes. Assim, o trem terá sua estabilidade garantida em ambos os casos (Brina, 1979).

4.2 Velocidades Limites nas Curvas

A velocidade máxima que um trem pode percorrer em uma curva é função do raio desta e da superelevação dada à mesma. À essa velocidade dá-se o nome de velocidade limite, e é o principal fator restritivo do nosso trem que irá circular e ambas as vias ferroviárias de bitolas diferentes.

Nas ferrovias brasileiras, os valores das superelevações se diferenciam das normas européias. Enquanto na Europa, normalmente se utilize valores máximos de 15 a 18 cm (na Bitola de 1,435 m), no Brasil a norma indica que a superelevação deve abranger 125 vezes em milímetros a bitola da via expressa em metros. Assim, de acordo com a norma, temos uma superelevação máxima nas estradas de ferro brasileiras de 12,5 cm para bitola métrica (bitola de 1,000 m de largura) e de 20,0 cm para bitola

larga (bitola de 1,600 m de largura). Usualmente adota-se 18 cm para bitola larga e 10 cm para bitola métrica.

Para que haja uma estabilidade do veículo parado na curva, temos que calcular um $h_{\text{máx}}$:

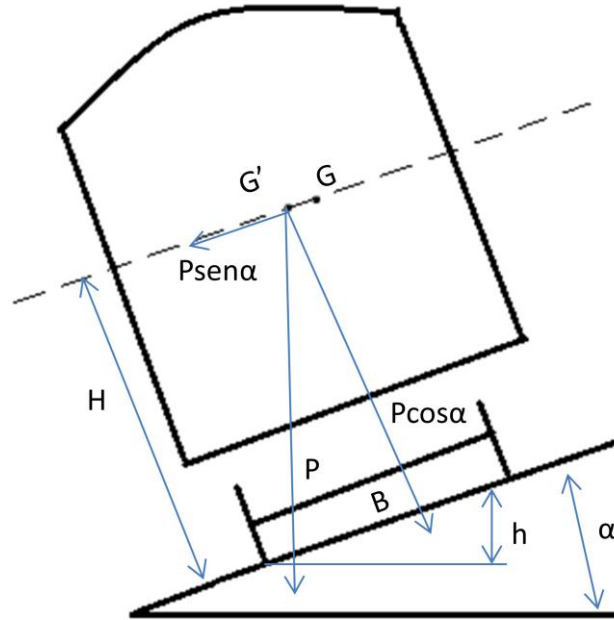


Figura 4.3 - Diagrama para cálculo de velocidade limite

Os componentes de peso serão $P \cos \alpha$ e $P \sin \alpha$. Tomando o momento em relação ao trilho, considerando um fator de segurança n ou em relação à excentricidade:

$$M_e = P \cos \alpha \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.39)$$

$$M_r = P \sin \alpha H = P \frac{h}{b} H \quad (4.40)$$

$$M_e = n M_r \quad (4.41)$$

$$h_{\text{máx}} = \frac{B}{H \cdot n} \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.42)$$

ou de acordo com a excentricidade:

$$h_{\text{máx}} = \frac{B}{H} (x_p - d), \text{ onde } x_p = H \frac{h}{B} + d. \quad (4.43)$$

Estabelecido o valor de $h_{\text{máx}}$, pode-se determinar o valor da velocidade limite nas curvas, pelo critério de segurança e conforto:

$$\text{Pela segurança: } h_{\text{máx}} = \frac{BV_{\text{máx}}^2}{127R} - \frac{B}{Hn} \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.44),$$

em função da velocidade:

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{127R \left(\frac{h_{\text{máx}}}{B} - \frac{\frac{B}{2} - d}{Hn} \right)} \quad (4.45)$$

$$\text{Pelo conforto: } h_{\text{máx}} = \frac{BV_{\text{máx}}^2}{127R} - \Delta h, \quad (4.46)$$

em função da velocidade:

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{127R \left(\frac{h_{\text{máx}} - \Delta h}{B} \right)} \quad (4.47)$$

Aplicando para cada bitola, encontra-se os valores informados na tabela 4-2.

4.3 Cálculo da Excentricidade

A ABNT estabelece em suas normas técnicas que “a resultante das forças que atuam sobre os veículos deverá ficar contida no terço médio central da Bitola, tanto para o trem mais rápido quanto para o trem parado sobre a curva”. Assim, devemos calcular o valor da excentricidade da resultante e relacionar essa com o coeficiente de segurança n contra o tombamento.

Suponhamos que a resultante R seja decomposta em duas forças ortogonais Q_1 e Q_2 , uma paralela à via inclinada e outra normal a essa via. Temos então:

$$Q_1 = R \cos \beta \quad (4.48)$$

$$Q_2 = R \cos \beta \left(\frac{n}{2} - \beta \right) = R \sin \beta \quad (4.49)$$

Neste caso, os momentos de “reviramento” e de “estabilidade” serão:

$$M_r = Q_2 \cdot H \quad (4.50)$$

$$M_e = Q_1 \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.51)$$

Fazendo $M_e = nM_r$ e substituindo os valores de Q_1 e Q_2 :

$$n = \frac{R \cos \beta \left(\frac{B}{2} - d \right)}{R \sin \beta H} \quad (4.52)$$

$$n = \frac{\left(\frac{B}{2} - d \right)}{\tan \beta H} \quad (4.53)$$

Sabe-se que:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x-d}{H} \quad (4.54)$$

$$M = \frac{\frac{B-d}{2}}{H \frac{x-d}{H}} = \frac{\frac{B-d}{2}}{x-d} \quad (4.55)$$

Então para a bitola métrica e a larga o x e o fator de segurança resultante são respectivamente:

$$x = \frac{B}{6}; \quad n = \frac{\frac{B-d}{2}}{x-d} \quad (4.56)$$

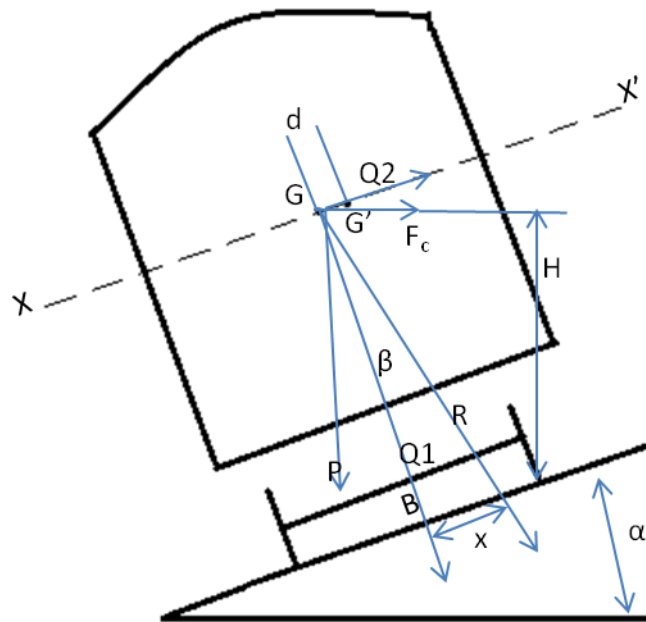


Figura 4.4 - Diagrama para cálculo da excentricidade

Para o caso da bitola estreita $x=0,18$ e da bitola larga $x = 0,28$ (Brina, 1979). Resultando em um coeficiente de segurança para cada caso de bitola, correspondente à excentricidade prescrita pela norma, isto é, que passe pelo terço médio da bitola. Aplicando para cada bitola, encontram-se os valores informados na tabela 4-2 da seção 4-7 deste capítulo.

4.4 Sobrecarga nas Curvas

No caso da força centrífuga não estar totalmente equilibrada, o que ocorre na maioria das vezes, os pesos que agem sobre os dois trilhos serão diferentes: haverá uma sobrecarga na roda externa. Para calcularmos a distribuição de peso em cada trilho, tomemos os momentos, primeiro em relação ao trilho externo e depois em relação ao trilho interno.

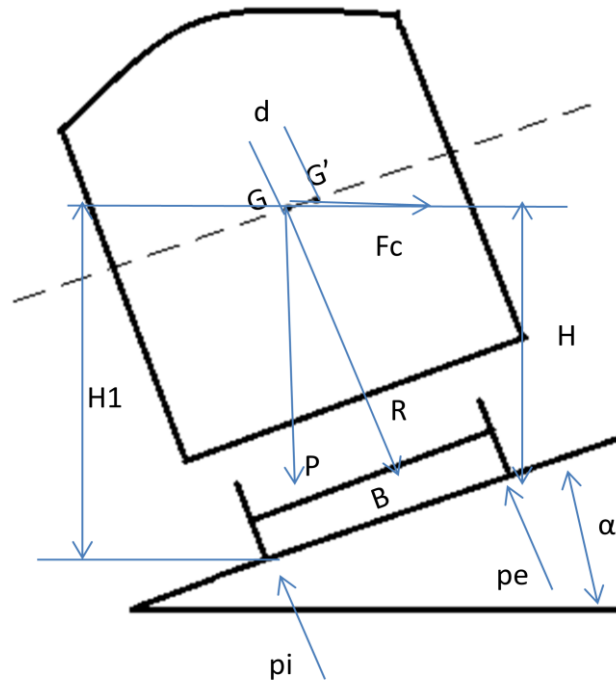


Figura 4.5 - Diagrama 5 do Veículo

$$\Delta F = F_c - F' = \frac{Pv^2}{127R} - P \sin \alpha \quad (4.57)$$

$$F_c - F' = \frac{Pv^2}{127R} - \frac{Ph}{B} \quad (4.58)$$

Sendo p_i a força na roda interna e p_e a força na roda externa:

Do momento em relação à roda externa:

$$\Delta F \cdot H + p_i \cdot B = P \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.59)$$

$$p_i = \frac{P}{B} \left(\frac{B}{2} - d \right) - \left(\frac{\Delta F \cdot H}{B} \right) \quad (4.60)$$

E do momento em relação à roda interna:

$$\Delta F \cdot H1 + P \left(\frac{B}{2} - d \right) = p_e \cdot B \quad (4.61)$$

$$p_e = \frac{P}{B} \left(\frac{B}{2} - d \right) + \left(\frac{\Delta F \cdot H1}{B} \right) \quad (4.62)$$

Podemos aproximar $H1 = H$, pois a diferença é muito pequena dada a altura do carro. Logo:

$$p_e = \frac{P}{B} \left(\frac{B}{2} - d \right) + \left(\frac{\Delta F \cdot H}{B} \right) \quad (4.63)$$

4.5 Forças Laterais nas Rodas

Sabe-se que o apoio das rodas de um vagão sobre determinada via, pode ser representado por um conjunto de forças mostrado na Figura 4-6 (CASTELO BRANCO, 2006).

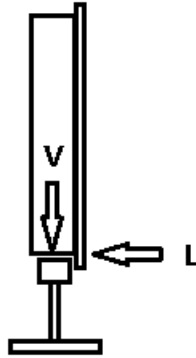


Figura 4.6 - Diagrama forças na roda

Vê-se que, sobre a roda, atuam forças laterais (L) e forças verticais (V), as quais obedecem uma condição de estabilidade, conforme a relação

$$\frac{V}{L} = 1 \quad (4.64)$$

Esta relação mostra que deve ser mantida uma proporcionalidade entre essas forças, para que o rodeiro fique estável sobre a via, principalmente nas curvas, onde a superelevação tem muita importância.

Quando determinada roda, de determinado truque, pertencente a determinado vagão se inscreve numa via desnivelada, sua carga vertical pode ser repentinamente reduzida, fazendo com que a relação se altere em favor da força lateral. Ao se tornar maior que a força vertical na condição de desnível, existe a tendência da força lateral forçar o friso a subir no boleto do trilho e descarrilar.

Assim, as condições de via e estabilidade devem ser constantemente verificadas para impedir a ocorrência desses fatores, que tendem a aumentar sempre que se eleva a carga por eixo.

“Outro vilão da estabilidade ferroviária é a carga devido vento. Não se deve ignorar este fator durante o projeto da estabilidade. Quanto maior e mais alto for o veículo, mais será sua atuação. A carga do vento atua diretamente sobre a superfície lateral, sofrendo a influência de sua forma. Os vagões tanque, por exemplo, por possuírem uma superfície arredondada, recebem uma parcela um pouco menor de esforços se comparada com aqueles existentes para vagões fechados ou as atuais plataformas Double-stack, com o empilhamento de 2 contêineres”. O ponto de aplicação da carga de vento, o centro de

pressão do vento, é calculado pela área lateral exposta ao seu efeito e por prática localizada na metade da área útil. Usualmente, usa-se um fator de 70kgf por m² (CASTELO BRANCO, 2006).

4.6 Utilização de Material e Normas Padrão

Para a aplicação das equações acima calculadas, devemos tomar algumas considerações sobre as características do trem, como as dimensões das rodas utilizadas, altura do centro de gravidade, deslocamento médio do centro de gravidade e peso aplicado sobre as rodas.

Para o material rodante de referência, um vagão de transporte de contêineres de peso bruto por eixo de 64 toneladas, dividido em dois truques de dois eixos cada (modelo B-B), devemos definir que restrições de cada norma (bitola estreita ou larga) devem ser utilizadas. Segue uma tabela das opções disponíveis e valores de referência do trem de cada via. (CASTELO BRANCO, 2006) e (BORGES NETO, 2010)

Tabela 4-1 - Valores de restrições nas normas

Valor limite	Bitola estreita (1,000 m)	Bitola Larga (1,600 m)
Altura CG (máx.)	1.828,8 mm – 72 in	2.489,2 mm – 98 in
Diâmetro da roda (min.)	743 mm – 25 ¼ in	838 mm – 33 in
Diâmetro da roda (máx.)	838 mm – 33 in	914 mm – 36 in
Dimensões (longit.) da base rígida	1575 mm – 62 in	1676 – 1778 / 66 – 70 in
Dimensões (larg.) mín. da base rígida mancal a mancal	1752,5 mm – 69 in	2325,5 – 91 ½ in
Gabarito máx. largura	2850,0 mm – 112 in	2975,0 mm – 117 in
Gabarito máx. altura	3800 mm – 149 ½ in	4200 mm – 165 3/8 in
Comprimento útil	14 m – 551 in	15 m – 590 in
Lotação	90 ton	119 ton
Margem de bitola (superior)	20 mm – ¾ in	20 mm – ¾ in
Margem de bitola (inferior)	15 mm – 0,6 in	15 mm – 0,6 in
Raio mínimo de curvatura	130 m – 142 yd	200 mm – 218,7 yd
Superelevação max.	180 mm – 7 in	100 mm – 4 in
Peso bruto por eixo	64 ton	64 ton

Pelos valores acima aferidos de acordo com as normas de estradas de ferro brasileira, verifica-se as dimensões dos truques, vagão e rodas a serem utilizadas (marcadas em amarelo) para a composição do vagão que trafegará em ambas. Assim, nota-se que a utilização dos truques utilizados nos vagões de bitola larga aplicados à plataforma de bitola estreita atendem às restrições de segurança relativas ao gabarito das vias, de acordo com as normas NBR 12110 e NBR 12740.

4.7 Análise dos Resultados

Aplicando agora finalmente os valores das equações resultantes do estudo dinâmico e as constantes utilizadas pelo material rodante adaptado e da via férrea em utilização, podemos encontrar as soluções das equações e as características da dinâmica do trem.

Tabela 4-2 - Valores Calculados

	Bitola estreita (1,000 m)	Bitola Larga (1,600 m)
Equação Velocidade Crítica por Segurança (4-45)	46,0 km/h	67,9 km/h
Equação Velocidade Crítica por Conforto (4-47)	49,2 km/h	63,6 km/h
Superelevação máxima recalculada (4-43)	115 mm – 4 ½ in	204 mm – 8 in
Excentricidade x (4-56)	180 mm – 7 in	280 mm – 11 in
Fator de segurança resultante da excentricidade (4-56)	5,37	4,1
Sobrecarga na curva (int-ext)	- (será verificada no próximo capítulo)	-
Velocidade mínima de trens de carga	29,3 km/h	32,0 km/h

5. ALTERAÇÕES NO MATERIAL RODANTE

Este capítulo apresenta o cálculo para as novas dimensões que seria utilizadas para a implantação do sistema de bitola variável, devido ao aumento das cargas comparadas às cargas experimentadas em outros países.

Depois de verificadas todas as restrições dimensionais e dinâmicas para o trem trafegar em ambas as ferrovias, abordar-se-á nesse capítulo as alterações necessárias no material rodante escolhido como referência para a adaptação desse implemento no modal ferroviário brasileiro.

Com a manutenção do truque de bitola larga e da plataforma do vagão de bitola estreita, serão necessárias alterações nos seguintes componentes do trem:

- Instalação e projetos de novo conjunto rodeiro (Roda e eixo);
- Adaptação dos truques para implementação dos novos mancais, rolamentos, acoplamentos e rodilhos de apoio;
- Adaptação do sistema de freio;
- Sistema de engates de altura variável nas plataformas.

Neste projeto, apresentaremos um pré-cálculo do eixo do vagão ferroviário em consideração, pois este componente é o único que tem mudanças de cargas consideráveis, sendo necessário o seu estudo resistência. O projeto final de todo o mecanismo não é o objetivo deste projeto, mas sim localizar e avaliar as adaptações inerentes à aplicação do mesmo, servindo como subsídio para um projeto mais específico (cada tipo de vagão, de carga ou de passageiro, tem suas capacidades de carga e medidas dimensionais de plataforma e carros, sendo assim, para cada caso um projeto de adaptação terá de ser efetuado).

5.1 Eixos

Os eixos de um vagão ferroviário normalmente utilizados podem ser resumido em um tipo, apresentando um afunilamento na parte central, com o menor diâmetro entre os trilhos. Os eixos ferroviários também apresentam outra característica singular. As mangas (ou munhões) se localizam na ponta dos eixos, enquanto a localização das rodas é interior. Os eixos normalmente são usinados ou fundidos, dependendo da aplicação.

Para a alteração da medida da bitola do eixo (a distância entre os pontos de contato das duas rodas), normalmente são utilizadas duas variações de soluções.

- Eixo interno móvel a um eixo vazado;
- Eixo fixo com deslizamento das rodas;

5.1.1 Eixos móveis

Para realizar a alteração da medida da bitola, esta solução, implementada no sistema BRAVA de câmbio automático de via, da CAF (CAF, 2011), é utilizado um eixo deslizante a um eixo de maior diâmetro e vazado, assim a roda permanece fixa e o acoplamento é realizado pelos mancais, que assumem duas posições diferentes (Ver figura abaixo).

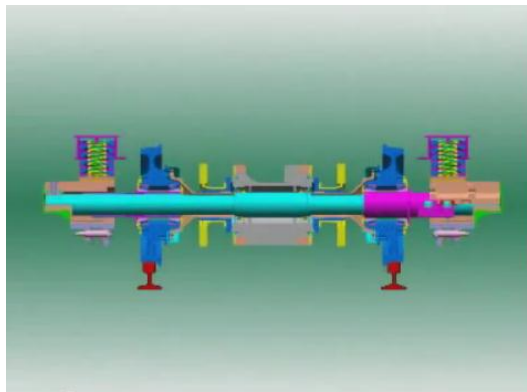


Figura 5.1- Eixo deslizante - Bitola estreita (CAF, 2011)

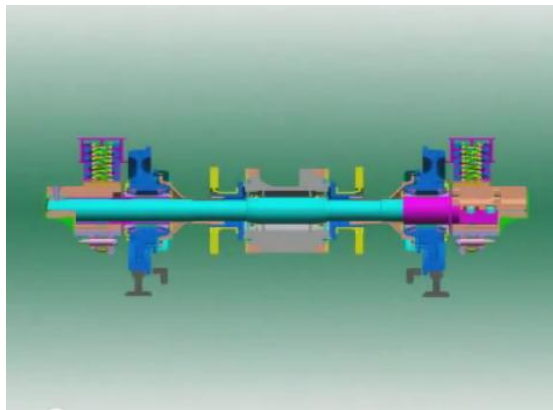


Figura 5.2 - Eixo deslizante - Bitola Larga (CAF, 2011)

Essa opção fornece um desempenho mais seguro do componente, já que o acoplamento é facilmente travado e destravado (pela ação de retirada e colocação do peso do vagão nos rodilhos e rodas) além de permitir uma distribuição de carga em ambos os eixos. O acoplamento resiste aos esforços laterais e ao momento fletor imposto no eixo.

Cada roda então possui um eixo que, de um lado, está conectado ao mancal e este ao acoplamento, que permite a translação do conjunto. No outro extremo, o eixo desliza no interior de um eixo vazado. Este eixo vazado também é rotativo. O peso do trem transferido aos rodilhos libera o acoplamento por meio de um sistema mecânico. Os freios podem ser aplicados nas rodas (com translação do conjunto de freios) ou nos eixos, sem a necessidade de alteração do sistema de frenagem (normalmente utilizado).

Este sistema pode ser implementado no truque presente na maioria dos vagões brasileiros, mas necessita de um aumento em sua largura devido ao acréscimo do comprimento do eixo para acomodar os acoplamentos. Dessa maneira, a travessa deve ser modificada.

Com essas alterações, um novo estudo da resistência do eixo deve ser efetuado para verificação da possibilidade de utilização do mesmo material devido aos maiores esforços na adaptação das bitolas brasileiras, e será mostrado na próxima seção deste capítulo.

Outra alternativa é a troca integral do truque, com aquisição junto às empresas fabricantes desse sistema, resultando no alto investimento indicado nos estudos do capítulo 3. Porém, como o intuito desse trabalho é fornecer subsídio para o desenvolvimento de um projeto nacional, logo essa opção de aquisição é descartada.

5.1.2 Eixo de Rodas Deslizantes

A outra solução adotada para implantação é menos utilizada em relação à anterior, porém permite a utilização de mais componentes já presentes no material rodante, sendo necessárias apenas algumas alterações. Somente o conjunto rodeiro (rodas mais eixos) deve ser substituído, assim a aplicação dessa solução se mostra um pouco mais demorada (já que as alterações são aplicadas no truque utilizado, e neste tempo o vagão fica ocioso, enquanto no eixo deslizante a troca do truque completo permite um tempo menor de implementação). Os novos eixos possuem algumas características essenciais: maior comprimento do ressalto referente à roda, para a distância de ambas as bitolas; ressaltos específicos para os acoplamentos especiais (para a fixação das rodas em ambas as posições, serão utilizados dois acoplamentos por roda, um em cada posição de bitola); Aplicação de estrias (eixo estriado na parte do acoplamento eixo-roda, que permite o deslizamento da roda). Com essas alterações, um novo estudo da resistência do eixo também deve ser efetuado, e será mostrado na próxima seção deste capítulo.

No restante dos componentes, esse tipo de bitola variável requer um projeto do sistema pneumático do freio, pois estes também devem se deslocar com a roda (no caso de freios aplicados à roda, no caso de freios de eixo não é necessário). No truque, é necessária a instalação do conjunto de rodeiros e acionadores mecânicos dos acoplamentos (já que estes, como no eixo deslizante, são acionados pelo peso do vagão transferido das rodas aos rodilhos e inversamente). As rodas terão de ser adaptadas para o acoplamento

(este será realizado no cubo da roda ou por furos e parafusos passantes) e a definição destes fica a critério dos disponíveis no mercado (tanto a CAF como a TALGO trabalham com fornecimento de acoplamentos para estes fins) ou de projeto individuais.

5.2 Cálculo de Resistência do Eixo

Com a alteração do comprimento e dos pontos de aplicação das forças no eixo, faz-se necessário um novo cálculo da resistência do mesmo, para verificar se é necessária uma alteração no diâmetro das seções para uma resistência estática e de fadiga. O cálculo dos eixos é relativamente simples, e leva-se em consideração a carga por roda e o dimensionamento por flexo-torção, porém as quebras em eixos ferroviários são causadas, na grande maioria das vezes, por fadiga devido à flexão. Assim, o dimensionamento dos eixos pode levar em conta somente essa carga. A flexão é devida ao peso dos vagões e a torção é resultante das frenagens. O eixo ferroviário é submetido a uma solicitação variável de tração e compressão.

5.2.1 Eixo com rodas deslizantes

Considerando nosso tipo de vagão para exemplificar o cálculo do eixo, tomamos as seguintes considerações e hipóteses. Esforços máximos serão ocasionados quando o trem trafega nas vias de bitola estreita, pois o momento fletor no eixo é maior devido à distância de aplicação das forças. Logo, o cálculo para resistência do eixo deve ser considerado com as seguintes medidas:

Tabela 5-1- Valores para o cálculo dos eixos

Dimensões e cargas	Valor
Centros de munhão	2209,8 mm – 87 in
Centros de trilho (bitola estreita)	1076,2 mm – 42,4 in
Altura CG	1828,8 mm – 72 in
Carga vertical pior caso (por eixo)	250 kN – 56.179 lbf
Carga horizontal pior caso	66,75 kN – 15.000 lbf
Diâmetro das rodas	838 mm – 33 in
Peso Bruto	64 ton – 627,2 kN – 140.628 lbf

Os centros de munhão são os valores aproximados para o comprimento do eixo de bitola variável no seu apoio no truque, adaptado para acomodar os acoplamentos e distâncias de trilhos da bitola larga. Os

centros de trilho são considerados somando-se as distâncias dos pontos de bitola das rodas (onde é considerado o ponto de carga roda-trilho) no caso da bitola estreita, resultando numa carga maior devido à distância dos pontos de apoio ser maiores. Altura do CG é a altura limite para o projeto (conforme tabela 4.1), e o mesmo procedimento é feito para a definição do diâmetro da roda. As cargas de pior caso aplicadas são oriundas do estudo de cargas limites de estabilidade para o trem de bitola estreita (CASTELO BRANCO, 2006). As cargas verticais aplicadas consideram uma distribuição de 80% da carga para um dos truques, e a carga horizontal é uma razão de 1/4 da carga aplicada verticalmente (foi aproximada para 15.000 lbf-66,75 kN para uma margem de segurança do efeito de vento).

Seguindo a seqüência de cálculo adotada para o cálculo de eixos em bibliografia de projeto (SHIGLEY, 2005). Os cálculos serão realizados no padrão Inglês de unidades, devido ao fato das medidas e capacidades usuais dos materiais ferroviários serem nessa medida. Apresentaremos, ao final, a conversão para o padrão S.I.

Para o diagrama de momento fletor:

1) Tratando do vagão, truque e rodas como um corpo livre.

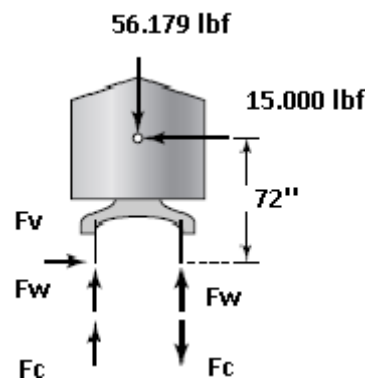


Figura 5.3 - Diagrama de forças no centro de massa do vagão e nas rodas

Assim, Momento de tombamento:

$$M = 15000(72) = 1080 (10^6) \text{ lbf.in} \quad (4.65)$$

Para força de resistência e a forças peso e lateral:

$$Fc = 1080(10^6) / 42,4 \text{ in} = 25471 \text{ lbf} \quad (4.66)$$

$$Fw = 56.179 / 2 = 28.089 \text{ lbf} \quad (4.67)$$

$$Fv = 45.334 \quad (4.68)$$

Assim, as forças em cada roda são:

$$R_1 = Fc + Fw = 53560 \text{ lbf} \quad (4.69)$$

$$R_2 = F_w - F_c = 2618 \text{ lbf} \quad (4.70)$$

2) Para o carro e o truque como corpo livre:

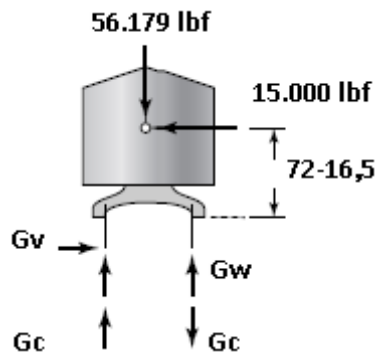


Figura 5.4 - Diagrama de forças no centro de massa do vagão e nos eixos

Momento de tombamento:

$$M = 15000(72 - 16.5) = 832,5 (10^6) \text{ lbf.in} \quad (4.71)$$

Para força de resistência e a forças peso e lateral:

$$G_c = 832,5 (10^6) / 87 \text{ in} = 9659 \text{ lbf} \quad (4.72)$$

$$G_w = 56.179 / 2 = 28.089 \text{ lbf} \quad (4.73)$$

$$G_v = 45.334 \quad (7.74)$$

Assim, as forças em cada mancal serão:

$$R_1 = G_w + G_c = 37748 \text{ lbf}$$

$$R_2 = G_w - G_c = 18430 \text{ lbf}$$

3) Para o eixo e rodas como um corpo livre:

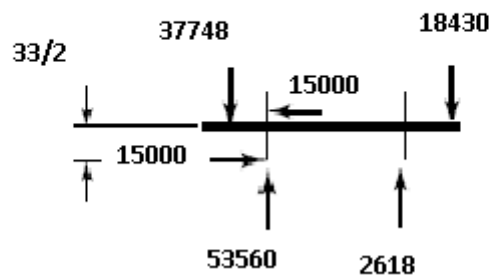


Figura 5.5 - Diagrama de esforços no eixo

Força devido ao momento da roda:

$$M_r = 15.000 (16.5) = 247500 \text{ lbf. in} \quad (4.75)$$

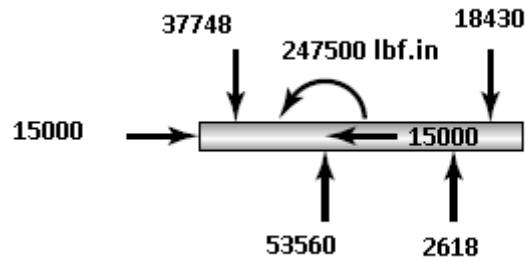


Figura 5.6 - Diagrama de esforços no eixo com momento da roda

Resultando num diagrama de momentos:

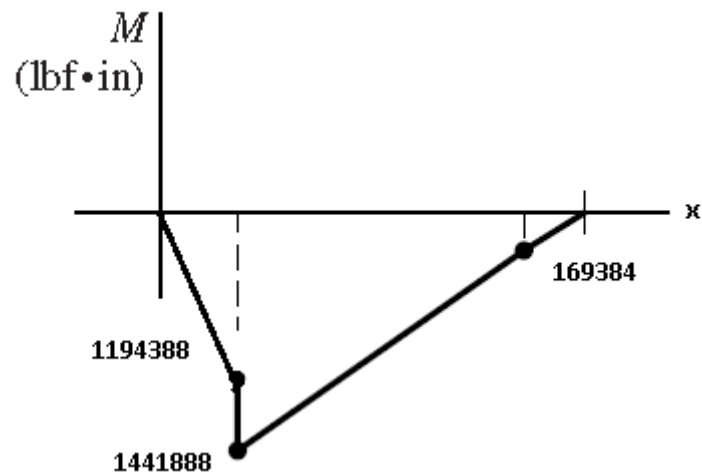


Figura 5.7 - Resultado dos momentos

Assim, o eixo deve resistir a um momento $M_{\text{máx}} = 1.441.888 \text{ lbf.in}$ no apoio do munhão e no caso do centro do eixo:

$$M_c = 37748(43,5) + 247.500 - 53560(21,2) = 745066 \text{ lbf.in} , \quad (4.76)$$

Justificando o afunilamento do centro do eixo. Os eixos de vagões ferroviários possuem um limite mínimo resistência de 105 kpsi (723 MPa). Considerando caso estático, o diâmetro mínimo tem valor de:

$$d^3 = \frac{32M}{\pi\sigma'} = 5,7 \text{ in (145 mm)}. \quad (4.77)$$

Será considerada para o dimensionamento de fadiga um diâmetro de 6 in.

A torção no eixo decorrente da frenagem do vagão depende da capacidade do sistema de freios. As normas brasileiras citam que um sistema de freios de um vagão carregado se limita num intervalo de 8,5% a 13% do peso bruto máximo do vagão. Assim, podemos assumir que os freios para cada eixo operam numa razão de ¼ dessa capacidade. Assim, para um peso bruto de 140.628 lbf, a força aplicada aos eixos, resultantes dos freios (no diâmetro da roda) é de 3575 lbf, resultando num torque de aproximadamente 58000 lbf.in.

Considerando o aço normalmente utilizado para a produção de eixos ferroviários, temos que o $S_{ut} = 80 \text{ kpsi}$ ou 550 MPa, com o $S_y = 67 \text{ kpsi}$ ou 460 MPa. Para a tensão alternada, utilizaremos os valores encontrados na condição limite de carga (vista anteriormente) e para a tensão média, será considerada a tensão encontrada no caso do trem em movimento retilíneo, com a divisão das cargas igualmente em cada roda.

Para a tensão média, a carga do vagão é distribuída igualmente entre os quatro eixos, resultando numa carga de 35157 lbf por eixo, e 17578,5 por roda. Para condição de estabilidade:

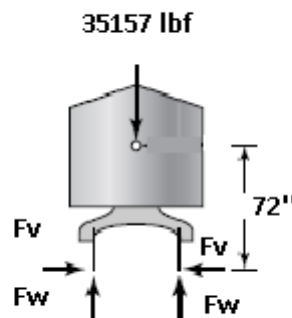


Figura 5.8 - Diagrama 3

$$F_v = 17578,5 \text{ lbf} \quad (4.78)$$

$$F_w = 17578,5 \text{ lbf} \quad (4.79)$$

Para o eixo:



Momento gerado pela força lateral na roda:

$$M_1 = 17578 (16,5) = 290045 \text{ lbf. In} \quad (4.80)$$

Momento devido às forças verticais:

$$M_2 = 17578 (22,3) = 391989 \text{ lbf.In} \quad (4.81)$$

Com o resultante:

$$Mr = 682034 \text{ lbf.In} \quad (4.82)$$

Diagrama de momentos:

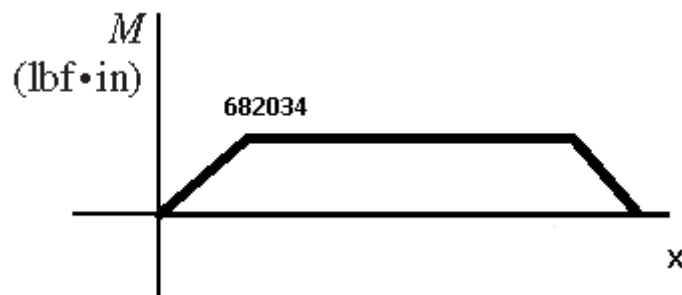


Figura 5.9 - Diagrama de momentos 2

Para o estudo da resistência à fadiga, usaremos o critério de Berger com um fator de segurança de 3 para o cálculo do diâmetro do eixo. De acordo com o critério de Berger, obtemos o diâmetro pela equação (Shigley,2005):

$$d = \left\{ \frac{8nA}{\pi Se} \left[1 + \left(1 + 3 \left(\frac{2BSe}{ASut} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/3} \quad (4.83)$$

onde:

$$A = \sqrt{4(KfMa)^2 + 3(KfsTa)^2} \quad (4.84)$$

$$B = \sqrt{4(KfMm)^2 + 3(KfsTm)^2} \quad (4.85)$$

Ou utilizando diretamente as tensões:

$$\frac{n\sigma'a}{Se} + \left(\frac{n\sigma'm}{Sut}\right)^2 = 1 \quad (4.86)$$

Sendo:

n = fator de segurança;

Se = Limite de resistência à fadiga

Sut = Limite de resistência à tração

$\sigma'm$ = tensão de Von Mises

$\sigma'a$ = componente da tensão média

Kf= Fator concentração de tensão em fadiga

Kfs= Fator de concentração de tensão em fadiga cisalhamento

Tm= Torçor Médio

Ta= Torçor Alternado

Ma=Fletor Médio

Mm= Fletor Alternado

Para o cálculo do Se:

$S'e=0,504(105).Ka.Kb$

Onde Ka e Kb (SHIGLEY, 2005):

$Ka = 0,787$ e $Kb = 0,858$

$S'e = 35,73$ kpsi

Para o nosso problema, como citado anteriormente, as tensão consideradas médias e alternadas serão as calculadas na situação de tráfego retilíneo serão:

$$\sigma'a = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right| \text{ e } \sigma'm = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.87)$$

Assim:

$$M_m = 1.061.961 \text{ lbf.in}$$

$$M_a = 151.971 \text{ lbf.in}$$

$$T_m = 58.000 \text{ lbf.in}$$

$$T_a = 0$$

$$K_f = 1,63^*$$

$$K_{fs} = 1,48^*$$

*valores de K_f e K_{fs} normalmente utilizados para eixos ferroviários, corrigido com o fator referente às estrias. (Brina,1979)

E chegamos ao diâmetro na seção das rodas, utilizando um fator de segurança de 3:

$$d = 10 \text{ in (9,95 in calculados)}$$

E na seção central do trilho:

$$M_m = 713.550 \text{ lbf.in}$$

$$M_a = 31.516 \text{ lbf.in}$$

$$T_m = 58.000 \text{ lbf.in}$$

$$T_a = 0$$

$$K_f = 1,57^*$$

$$K_{fs} = 1,38^*$$

*valores de K_f e K_{fs} normalmente utilizados para eixos ferroviários (Brina, 1979)

E chegamos ao diâmetro na seção das rodas:

$$d = 5,5 \text{ in (140 mm)}.$$

Os cubos de roda para o tipo de vagão apresentado utilizam um diâmetro do assento da roda de 7 in (178 mm), e no caso do afunilamento do eixo, o valor usualmente considerado é de 5 3/8'' (136 mm), em um eixo ferroviário de manga de 5 1/2'' (140 mm) x 10'' (254 mm).

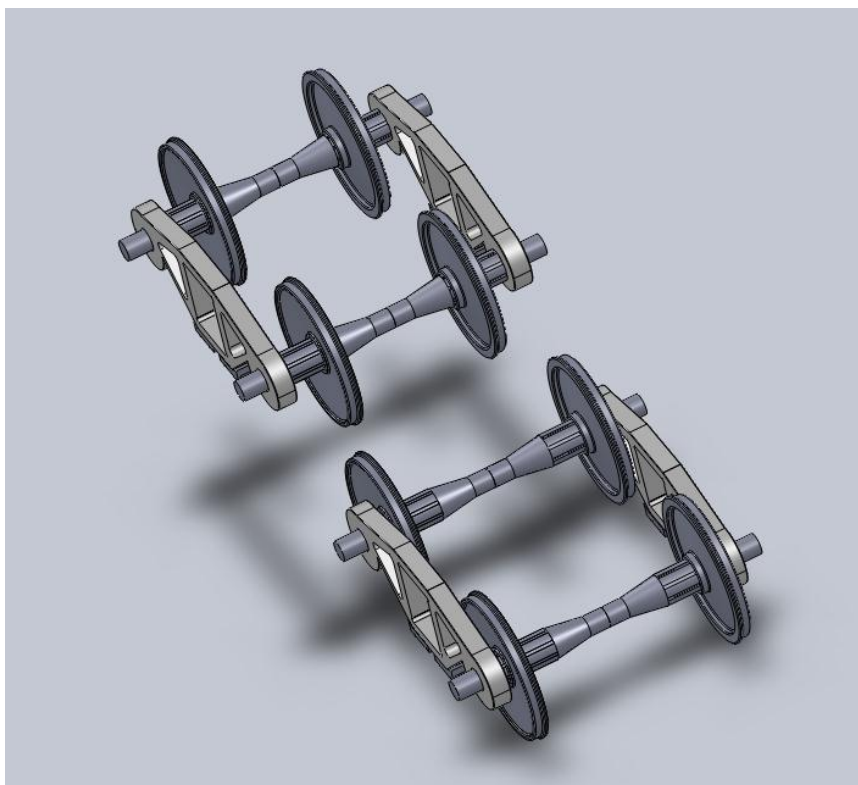


Figura 5.10 - Layout ambas as posições eixos de rodas deslizantes

5.2.1.2 Demais componentes

Os demais componentes para a modificação do truque incluem dispositivos que não necessitam de projeto, pois são escolhidos por meio de seleção de catálogos de fabricantes, como mancais, rodas e acoplamentos, e rodilhos.

As rodas usuais possuem um comprimento de cubo proporcional ao diâmetro do cubo na face interna. Para a aplicação do acoplamento, esta fixação pode ser feita no cubo da roda por meio de travas, necessitando um ligeiro prolongamento do cubo. No caso de eixo com ranhuras para a transmissão de torques, o acoplamento somente sofre o esforço longitudinal ao eixo, correspondente à força lateral do veículo. Este deve ter um fator de segurança elevado, pois o mal funcionamento deste dispositivo acarretaria certamente em um descarrilamento. Portanto, algumas redundâncias são necessárias. A CAF e a TALGO fornecem acoplamentos para os devidos fins, já em relação à carga lateral máxima admitida e tipo de roda utilizado, que também pode ser fornecido.

O sistema de freios deve ter um grau de liberdade na direção paralela ao eixo, para que, no caso de freio aplicado às rodas, estes possam se deslocar juntamente.

As travessas não sofrem alterações, pois os acoplamentos se encaixam nas folgas existentes nos truques de bitola larga.



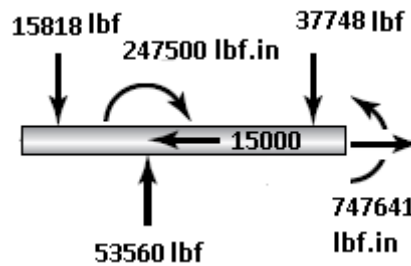


Figura 5.13 - Diagrama 5

Resultando num diagrama de momentos:

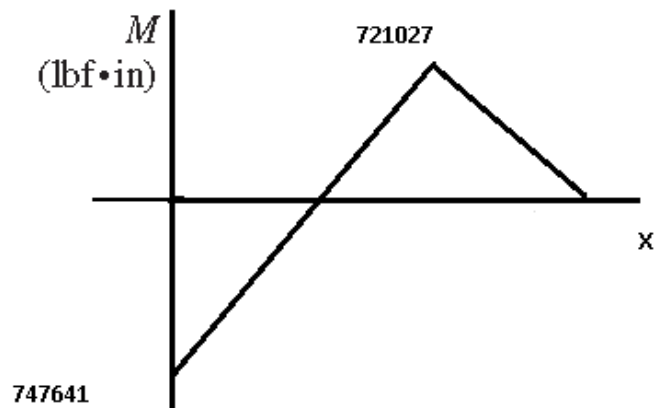


Figura 5.14- Diagrama 6

Verifica-se que ambos os eixos experimentam cargas simétricas, logo o dimensionamento de um dos eixos é suficiente. Igualmente para o caso de ambas as posições de bitola, já que o acoplamento com a roda se dá na seção média do comprimento do eixo, e o apoio em ambas as pontas se dá por uma extensão de aproximadamente 8 polegadas (Mangas usuais para esse tipo de eixo). Assim, o cálculo de dimensionamento por resistência, utilizando os passos da equação 4.83 até a 4.86 para esse caso, resulta num diâmetro aproximado de: $d = 8,5 \text{ in}$ (137 mm).

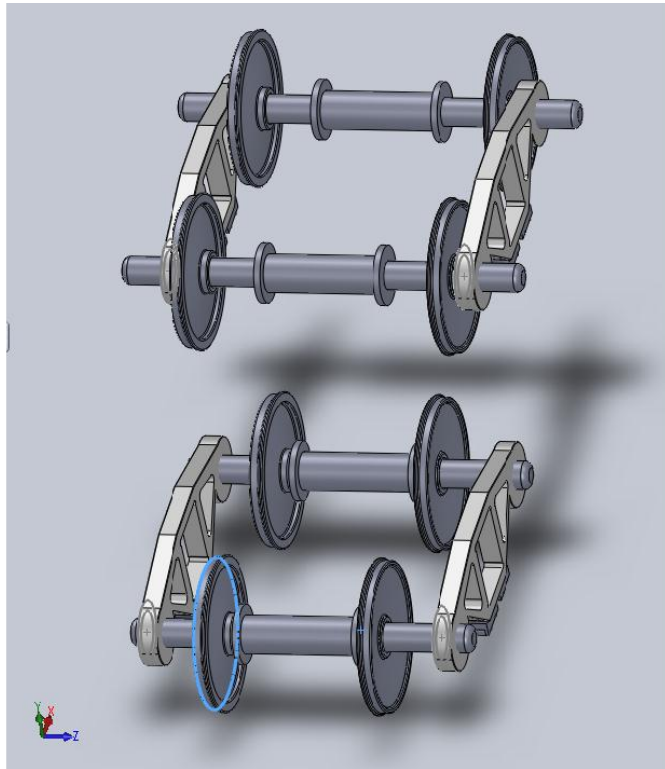


Figura 5.15 - Layout ambas as posições do sistema de eixo deslizantes

5.2.2.2 Demais componentes

Igualmente ao sistema de rodas deslizantes, a implantação do sistema de eixos móveis requer uma série de componentes para o funcionamento do mesmo. O acoplamento pode ser selecionado no catálogo das empresas CAF ou TALGO, que fabricam acoplamentos para os devidos fins. A aplicação do freio no eixo facilita a implantação desse projeto, pois não necessita a translação do sistema de freios. As rodas e rodilhos também podem ser selecionados pelos catálogos de fabricantes.

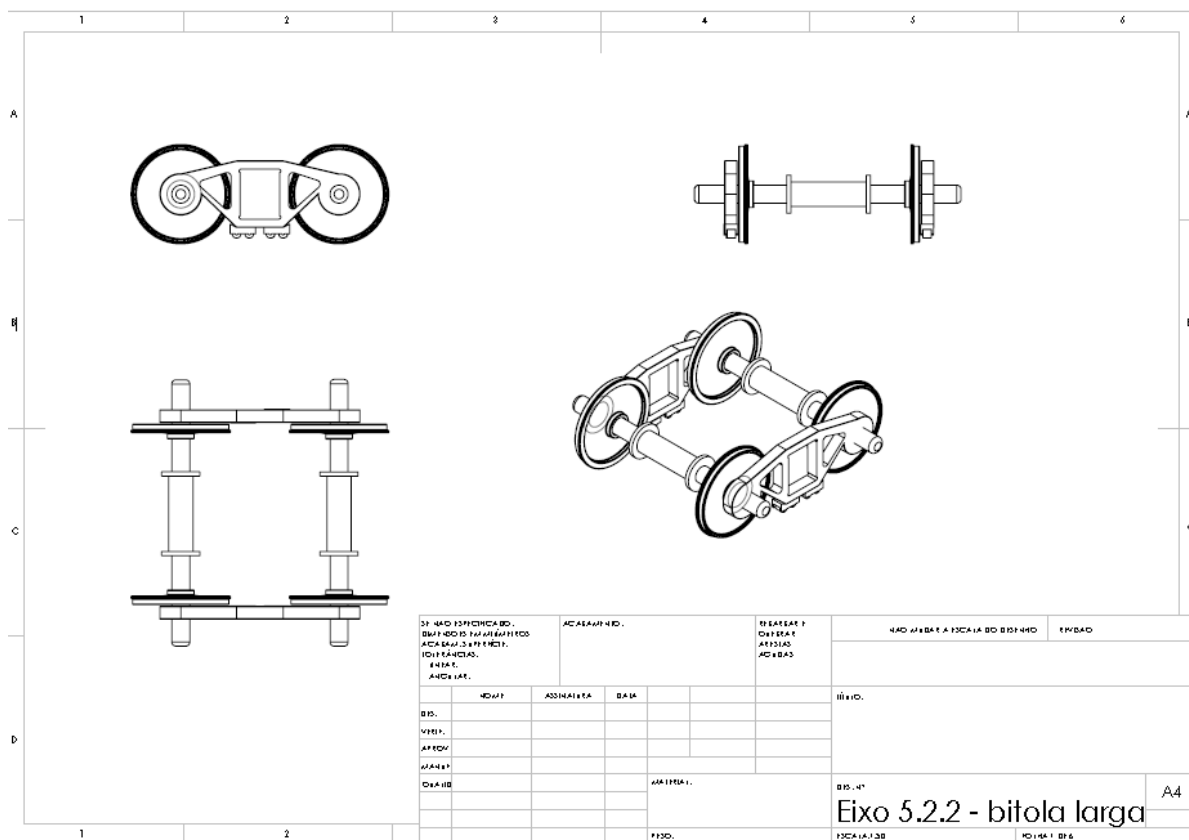


Figura 5.16 vistas do eixo

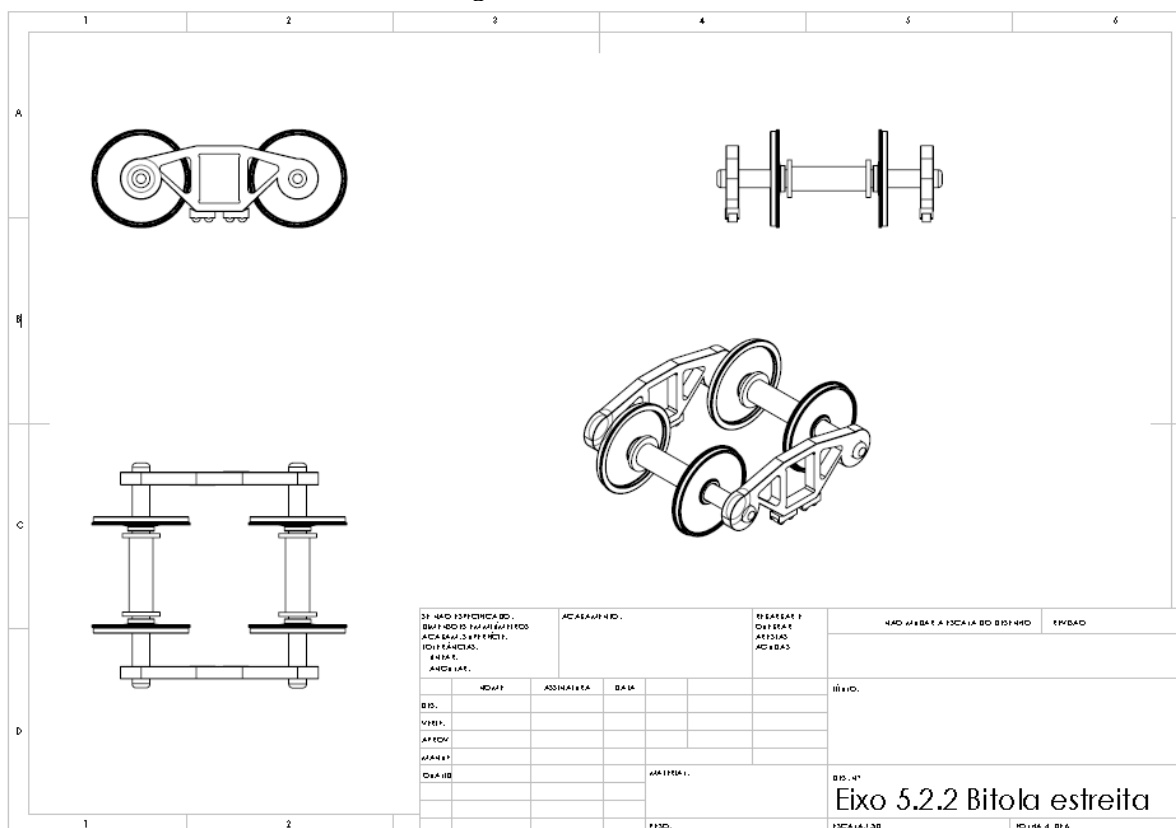


Figura 5.17 - vistas do eixo 5.2.2 na bitola estreita

6. CONCLUSÃO

Vimos ao decorrer do projeto que o problema das diversidades de bitolas empregadas nas ferrovias brasileiras é um dos principais problemas técnicos que impossibilitam a integração do sistema ferroviário no Brasil. As soluções empregadas nas diversas partes do mundo são também aplicáveis no caso brasileiro. A mais moderna dessas opções é que reduz ao máximo o tempo perdido devido à troca de via é a utilização de um eixo de bitola variável. Por meio de uma comparação de tempo de processos e custos, verificamos que, apesar de um alto investimento inicial, considerando a adaptação de mais de um trem de carga, os custos de operação são semelhantes e o tempo perdido no transbordo é praticamente desprezível, comprovando a intenção principal desse projeto, da instalação de um sistema desse tipo no material rodante brasileiro.

A metodologia fornecida por esse estudo para a implantação de um eixo de bitola variável no material rodante brasileiro foi definida então em quatro etapas:

- Estudo de viabilidade econômica;
- Atribuição das dimensões do trem para adequar-se aos gabaritos das vias;
- Estudo da estabilidade do trem em ambas as vias;
- Estudo do incremento dimensional do eixo para resistir ao maior esforço resultante da variação de bitola de 11,8 in (300 mm).

Para resultar numa economia do investimento necessário para uma tecnologia semelhante, após constatarmos que a maioria dos vagões no Brasil utiliza o mesmo layout de truque, essa adaptação pode ser realizada com um mínimo de substituição de peças, reduzidas somente ao componente rodeiro, e à instalação dos dispositivos no truque que permitem essa alteração, como os rodilhos, alteração no sistema de freios e mancais alterados devido às novas cargas de restrição e dimensões dos eixos. Estes são os componentes mais influenciados por esta alteração, já que o cálculo das tensões aplicadas a eles são elevados em comparação aos truques originais de ambas as bitolas com a mesma carga. Assim, o truque deve ser adaptado para a instalação do novo eixo de maior diâmetro.

As dimensões de alguns dos componentes do trem (truques, rodas, plataformas) foram definidas de acordo com as restrições das normas em vigor. A utilização de plataformas e vagões de bitola estreita restringem a capacidade de carga do trem, mas permite uma maior segurança quanto à dinâmica do trem, normas de geometria de via e ao espaço das margens das ferrovias.

Devido ao maior distanciamento entre as bitolas, um estudo do dimensionamento foi efetuado para comparar os efeitos dessa sobrecarga aos eixos utilizados em outros países nos sistemas semelhantes. O dimensionamento do eixo de rodas deslizantes resultou num eixo de diâmetros 140 mm (5,5 in) na parte centra e 254 mm (10 in) na seção dos apoios das rodas. Um acréscimo de cerca de 43% no diâmetro para

que este eixo, com o mesmo material utilizado nos outros sistemas, suporte a carga aplicada. No caso do eixo deslizante, o diâmetro encontrado foi de 216 mm (8,5 in), um acréscimo também cerca de 43% em seu diâmetro em comparação com o diâmetro utilizado nos sistemas já existentes.

O projeto desse sistema deve considerar diversas redundâncias em seu escopo, pois muitos dispositivos são essenciais ao funcionamento do trem e a falha destes resultaria numa situação catastrófica.

A aplicação de um sistema de bitola variável é viável e mostra-se uma excelente oportunidade de flexibilização do modal ferroviário brasileiro, podendo ser uma solução de integração entre as regiões do Brasil, tanto para o transporte de cargas como o de passageiros, possibilitando a abertura de novas opções de meios de transporte, por exemplo, na Copa do Mundo FIFA de 2014. Um sistema eficiente de trens de passageiros com o uso de bitolas variáveis possibilitaria o tráfego de turistas e delegações entre as cidades-sede, se tornando menos dependentes de um possível transtorno no transporte aéreo. A distância entre as cidades corrobora a competição entre esses modais.

Vale ressaltar que o trem de bitola variável é uma exceção à regra, portanto o estudo de uma normalização (ou adequação da normalização espanhola à brasileira) para esse tipo de trem específico deve ser realizado.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALAF. (2004). *Atlas Ferroviário Latino Americano* .
- ALL Logística, L. (15 de 10 de 2011). Questionamento acerca dos processos de transbordo. (F. G. Santos, Entrevistador)
- ANTF. (2011). *Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários*. Acesso em 2011 de 05 de 15, disponível em www.antf.org.br
- ATA, A. (2011). *Truckline*. Acesso em 15 de 04 de 2011, disponível em <http://www.truckline.com/Pages/Home.aspx>
- BORGES NETO, C. (2010). *Manual Didático de Ferrovias*. .
- Brina, H. L. (1979). *Estradas de Ferro Vol. I e II*. São Paulo: LTC.
- CAF. (2011). http://www.caf.es/caste/productos/equipamientos_brava.php. Acesso em 29 de 11 de 2011, disponível em www.caf.es: http://www.caf.es/caste/productos/equipamientos_brava.php#
- CASTELO BRANCO, J. E. (2006). *Tratado de estradas de ferro: Prevenção e investigação de descarrilamentos*.
- CASTRO, N. (1999). *Custos de transporte e a estrutura espacial do comércio interestadual brasileiro*. . Rio de Janeiro: Nemesys.
- CIA. (2009). *Comparação das ferrovias nos países*. Acesso em 20 de 05 de 2011, disponível em <http://www.indexmundi.com/g/r.aspx?v=113&l=pt>
- DAVID, E. G. (1998). *Transporte Intermodal Rodo-Ferroviário: o Estado da Arte*. . Rio de Janeiro, RJ.
- EIF. (2011). *EIF LOCOMOTIVAS*. Acesso em 16 de 05 de 2011, disponível em EIF LOCOMOTIVAS: <http://www.eiflocomotivas.com.br/>
- ESCAP. (1996). The Railway Break-of-gauge Problem and Possible Solutions in the ESCAP Region.
- FERRONORTE. (2006). *Caracterização das ferrovias*.
- (2001). Logística Empresarial, a Perspectiva Brasileira. In: e. a. FLEURY. São Paulo: Atlas.
- Kanclerz, M. (2007). Study on European Automatic Track Gauge Changeover Systems.
- Kotler, P. (1974). *Administração e Marketing - Análise, Planejamento e Controle*.
- LAMBERT, D. (1994). *CUSTOS LOGÍSTICOS, PRODUTIVIDADE E ANÁLISE DE DESEMPENHO*.

LIMA, B. (2002). *SÃO PAULO E AS CONCESSÕES FERROVIÁRIAS*. Mimeo.

Santos, S. d. (2011). Artigos sobre integralização das ferrovias - . *Portogente* .

(2005). In: J. E. SHIGLEY, *Projetos de Engenharia Mecânica*. Bookman.

STN, S. d. (2011). *Prestação de contas*. Acesso em 14 de 09 de 2011, disponível em <http://www.brasil.gov.br/sobre/o-brasil/governo/prestacao-de-contas>

wikipedia. (11 de 07 de 2011). Acesso em 04 de 11 de 2011, disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Truque_ferrovi%C3%A1rio

XX, x. *Tratado*.